

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνει τις σπουδές μου στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Κλείνει έναν κύκλο γεμάτο γνώση και εμπειρία για την πιο απαιτητική συνέχεια που ακολουθεί, αυτή του διπλωματούχου μηχανολόγου μηχανικού.

Κατ' αρχάς, θα ήθελα να αποδώσω ειδική μνεία στον καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, κ. Εμμανουήλ Κακαρά, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το τόσο σημαντικό και ενδιαφέρον θέμα.

Εν συνεχεία θέλω να αναφερθώ στην καθοριστική μέριμνα και επίβλεψη, την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του επίκουρου καθηγητή κ. Σωτηρίου Καρέλλα για την εκπόνηση και ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Επίσης, τους μεταπτυχιακούς φοιτητές και συναδέλφους μηχανολόγους μηχανικούς κ. Δημήτριο Κουρκούμπα και κ. Γεώργιο Πανούση για τις πληροφορίες και παρατηρήσεις που μου παρείχαν καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω πολύ τους δικούς μου ανθρώπους για την υπομονή και ανοχή που επέδειξαν καθώς και την πολύτιμη συμπαράστασή τους καθ'όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου πορείας.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

Αθανάσιος Ρήγας

Περίληψη

Η ενέργεια είναι ο μοχλός ανάπτυξης της οικονομίας και της κοινωνίας σε όλες τις χώρες του κόσμου. Η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να χαρακτηρίζεται από οικονομικότητα, μεγάλη ασφάλεια, υψηλή ποιότητα και ήπια συμπεριφορά στο περιβάλλον κατά την παραγωγή και την κατανάλωσή της. Η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας λόγω της αύξησης του πληθυσμού, η ταυτόχρονη μείωση των πετρελαϊκών αποθεμάτων και τέλος η ολοένα μεγαλύτερη ανάγκη μείωσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, έχουν καταστήσει αναγκαία τη βελτίωση των τεχνολογιών για παραγωγή «καθαρής» ηλεκτρικής ενέργειας. Πάνω σε αυτές τις ανάγκες που διαμορφώνονται, η παραγωγή και χρήση συνθετικού φυσικού αερίου (SNG) είναι μια αρκετά αξιόπιστη λύση. Ειδικότερα για την Ελλάδα, χώρα, πλούσια σε κοιτάσματα λιγνίτη, όπου η παραγωγή συνθετικού φυσικού αερίου από τον λιγνίτη, δύναται να την καταστήσει αυτόνομη ενεργειακά.

Οι μονάδες που προσομοιώθηκαν είναι μονάδες συνδυασμένου κύκλου με αέριο καύσιμο που προκύπτει από αεριοποίηση λιγνίτη μέσω οξυγόνου. Αυτές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: α) μονάδες που προσομοιώθηκαν με απλή καύση συνθετικού αερίου, παραγόμενο στον αεριοποιητή και β) μονάδες με επεξεργασία του συνθετικού αυτού αερίου για τελική παραγωγή και καύση συνθετικού φυσικού αερίου στον συνδυασμένο κύκλο. Απώτερος στόχος είναι η σύγκριση των δύο αυτών τύπων.

Αναλυτικότερα, ως προς τη διάρθρωση της εργασίας, στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια γενικότερη αναφορά για την παραγωγή, χρήση του φυσικού αερίου καθώς και τις γεωπολιτικές προεκτάσεις που προκύπτουν από την διακίνησή του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτενέστερη περιγραφή για την παραγωγή του συνθετικού φυσικού αερίου (SNG). Αναγράφονται οι βασικές αρχές παραγωγής του, η ιστορική επισκόπηση της τεχνολογίας και οι πρόσφατες εξελίξεις.

Στα κεφάλαια 3,4,5,6,7 περιγράφονται αναλυτικά οι τεχνολογίες που συνθέτουν την παραγωγή συνθετικού αερίου. Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται ο

διαχωρισμός του αέρα στα στοιχεία του, για την παραγωγή του απαιτούμενου οξυγόνου. Κατόπιν, στο κεφάλαιο 4 περιγράφονται οι βασικές αρχές αεριοποίησης, τα είδη αεριοποίησης και πιο συγκεκριμένα η αεριοποίηση με καθαρό οξυγόνο. Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 5 ακολουθεί η περιγραφή της αντίδρασης μετατόπισης νερού-αερίου και πώς υλοποιείται στον αντίστοιχο αντιδραστήρα. Στο κεφάλαιο 6, περιγράφεται η καρδιά του συστήματος παραγωγής SNG η οποία είναι ο μεθανοποιητής και τέλος στο κεφάλαιο 7 γίνεται εκτενής αναφορά στον «καθαρισμό» του αερίου δια της δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα από το συνθετικό φ.α.

Τα κεφάλαια 8 και 9 περιγράφουν την προσομοίωση των ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων με παραγωγή και καύση SNG και SynGas αντίστοιχα. Εκεί παρατίθενται στα διαγράμματα του IPSEpro™ καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε πίνακες και διαγράμματα.

Τέλος στο κεφάλαιο 10 γίνεται μια συγκριτική σύνοψη των δύο κατηγοριών ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων και εξάγονται τα απαιτούμενα συμπεράσματα από αυτή τη σύγκριση.

Λέξεις κλειδιά : Συνθετικό φυσικό αέριο (SNG), Διαχωρισμός αέρα, Αεριοποίηση, Μεθανοποίηση, Δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα, συνδυασμένος κύκλος, ΛΑΘ απλού και διπλού τυμπάνου.

Abstract

Energy is the key factor for the growth of economy and the development of the society in every country. Electric power has to be designated by cost of effectiveness, high quality, significant safety and mild behavior to the environment during its production and consumption. The increasing energy consumption due to the growth of population, the simultaneous reduction of the oil reserves and the increasing need to reduce the environmental pollution, have made it necessary to develop the technology to produce “clean” electric power. According to those needs that are being formed, the production and usage synthetic natural gas (SNG) is a reliable measure and solution. Especially for Greece, a country with large lignite reserves, this technology could make it self sufficient.

The main purpose of this diplomatic thesis is to examine the production of synthetic natural gas from lignite and its implementation to Integrated Gasification Combined Cycle plants (IGCC), based on oxy gasification of lignite. The simulated plants have been grouped into two main categories, depending on the methanation process that have been applied or not.

Specifically, in the structure of this thesis, in chapter 1 there is a general review on the production and usage of natural gas, and the geostrategic extensions from its transportation.

In chapter 2, there is an extensive description of the production of synthetic natural gas (SNG), the main principles of its production, the historic reference of this technology and the recent developments on it.

In chapters 3,4,5,6,7 the technologies that compound the SNG production. Specifically, the topic of chapter 3 is the separation of air to produce high purity oxygen. Then, in chapter 4 the main principles, the types of coal gasification have been described, and especially the oxy-gasification. Afterwards, in chapter 5, follows the description of the water-gas shift reactor, and in chapter 6 the “heart” of this technology, the methanation process. In chapter 7 there is an extensive reference of the CO₂ absorption technology.

The simulation of the IGCC plants with the implementation of methanation has been described in chapter 8 and in chapter 9 those without this implementation respectively. There are all the data and results in tables and diagram forms.

At the end of this thesis, in chapter 10, there have been a comparative summary between those two types of IGCC plants and the necessary conclusions following this comparison.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	1
Περίληψη	2
Περιεχόμενα	6
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή	10
1.1. Το φυσικό αέριο γενικά	10
1.2. Χρήσεις φυσικού αερίου	13
1.3. Πολιτικές και οικονομικές προεκτάσεις	14
Κεφάλαιο 2 - Παραγωγή SNG	17
2.1. Εισαγωγή	17
2.2. Γενική περιγραφή παραγωγής SNG	18
2.3. Ιστορική αναδρομή	21
2.4. Αντιδραστήρες μεθανοποίησης	22
2.4.1. Μεθανοποίηση σε σταθερή κλίνη	22
2.4.2. Μέθοδος Lurgi	22
2.4.3. Μεθανοποίηση σε ρευστοποιημένη κλίνη	24
2.5. Πρόσφατες εξελίξεις	24
Κεφάλαιο 3 - Μονάδα διαχωρισμού του αέρα στα στοιχεία του	26
3.1. Ιστορική επισκόπηση	26
3.2. Προεπισκόπηση/Περιγραφή της μεθόδου	27
3.3. Προσομοίωση του μοντέλου λειτουργίας της ASU στο IPSEpro™	31
Κεφάλαιο 4 - Αεριοποίηση	42
4.1. Γενικά περί αεριοποίησης	42
4.1.1. Αεριοποίηση	42

4.1.2. Περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα	44
4.1.3. Οφέλη στην απόδοση	45
4.1.4. Λειτουργία αεριοποιητή	46
4.1.5. Τεχνολογικοί τύποι αεριοποίησης	50
4.1.6. Αεριοποίηση γαιάνθρακα με οξυγόνο	55
4.1.7. Καύση vs Αεριοποίηση	58
4.2. Μοντελοποίηση αεριοποιητή	60
Κεφάλαιο 5 - Αντιδραστήρας μετατόπισης νερού/αερίου	62
5.1. Γενικά	62
Κεφάλαιο 6 - Μεθανοποίηση και μέθοδοι αυτής	66
6.1. Ορισμοί και εφαρμογές	66
6.1.1. Γενικά	66
6.1.2. Αρχές μεθανοποίησης	67
6.1.3. Καταλύτες	68
6.1.4. Μεθανοποίηση ως βήμα παραγωγής καθαρού υδρογόνου	69
6.1.5. Μεθανοποίηση "πλούσιου" αερίου	69
6.1.6. Μεθανοποίηση σε ρευστοποιημένη κλίνη	71
6.1.7. Σύνθεση μεθανίου με περιορισμό του ατμού	71
Κεφάλαιο 7 - Δέσμευση CO ₂ (MDEA)	73
Κεφάλαιο 8 - Προσομοίωση μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με μεθανοποίηση	75
8.1. 1η Περίπτωση κυκλώματος απλού τυμπάνου	77
8.2. 2η Περίπτωση κυκλώματος διπλού τυμπάνου	99
8.3. 3η Περίπτωση κυκλώματος απλού τυμπάνου	105
8.4. 4η Περίπτωση κυκλώματος διπλού τυμπάνου	109

8.5. 5η Περίπτωση κυκλώματος απλού τυμπάνου	111
8.6. 6η Περίπτωση κυκλώματος διπλού τυμπάνου	114
8.7. 7η Περίπτωση κυκλώματος απλού τυμπάνου	116
8.8 8η Περίπτωση κυκλώματος διπλού τυμπάνου	121
8.9 Σύνοψη κυκλωμάτων αεριοποίησης λιγνίτη με οξυγόνο	123
Κεφάλαιο 9 - Προσομοίωση ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων χωρίς μεθανοποίηση	126
9.1. 1η Περίπτωση κυκλώματος απλού τυμπάνου	127
9.2. 2η Περίπτωση κυκλώματος διπλού τυμπάνου	140
9.3. 3η Περίπτωση κυκλώματος απλού τυμπάνου	147
9.4. 4η Περίπτωση κυκλώματος διπλού τυμπάνου	152
9.5. 5η Περίπτωση κυκλώματος απλού τυμπάνου	154
9.6. 6η Περίπτωση κυκλώματος διπλού τυμπάνου	157
9.7. 7η Περίπτωση κυκλώματος απλού τυμπάνου	159
9.8. 8η Περίπτωση κυκλώματος διπλού τυμπάνου	161
9.9. 9η Περίπτωση κυκλώματος απλού τυμπάνου	163
9.10. 10η Περίπτωση κυκλώματος διπλού τυμπάνου	166
9.11. Σύνοψη για τις μονάδες χωρίς μεθανοποίηση	168
Κεφάλαιο 10 - Σύγκριση μονάδων	170
10.1. Δομική σύγκριση	170
10.2. Ποιοτική σύγκριση	171
Συμπεράσματα – Προστάσεις	188
Βιβλιογραφία	192
Παράρτημα 1 - Μοντελοποίηση ASU στο MDK του IPSE-Pro™	195
Παράρτημα 2 -Μοντελοποίηση αεριοποιητή οξυγόνου στο MDK του	204

IPSE-Pro™

Παράρτημα 3 - Μοντελοποίηση αντιδραστήρα μετατόπισης στο MDK του

IPSE-Pro™ 213

Παράρτημα 4 - Μοντελοποίηση μεθανοποιητή στο MDK του IPSE-Pro™ 219

Παράρτημα 5 - Μοντελοποίηση στοιχείου δέσμευση CO₂ στο MDK του

IPSE-Pro™ 225

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

1.1. Το Φυσικό Αέριο γενικά [1]

Το φυσικό αέριο αποτελείται από μείγμα υδρογονανθράκων προερχόμενο από πετρελαιοφόρες κοιλότητες. Τα κυριότερα συστατικά του είναι το μεθάνιο (CH_4) και το αιθάνιο (C_2H_6) και η κατώτερη θερμογόνος ικανότητά του κυμαίνεται από 30 έως 40 MJ/m^3 . Συγκριτικά με τα υπόλοιπα καύσιμα παρουσιάζει πλεονεκτήματα όπως :

- Δεν χρειάζεται εκτεταμένη επεξεργασία πριν τη χρήση.
- Η καύση του είναι φιλική προς το περιβάλλον, αφού δεν παράγονται επικίνδυνοι ρύποι.
- Αναμιγνύεται εύκολα με τον αέρα καύσης, χωρίς να απαιτείται διάταξη διασκορπισμού.
- Έχει σχετικά υψηλή θερμογόνο ικανότητα.
- Δεν περιέχει θείο (το οποίο είναι επικίνδυνο για το περιβάλλον, καθώς είναι επίσης ισχυρά διαβρωτικό όταν μετατρέπεται σε θειικό οξύ (H_2SO_4)).

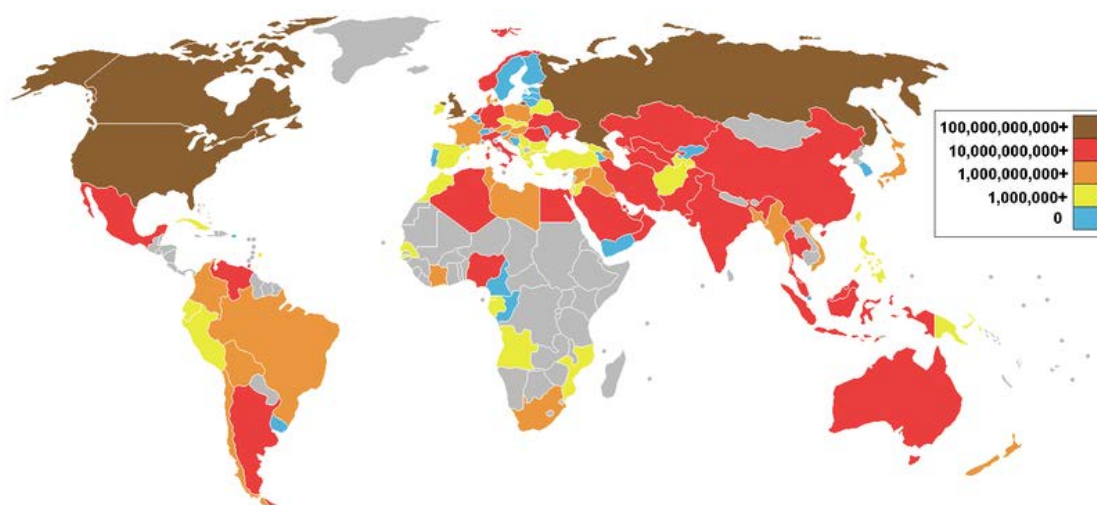
Το φυσικό αέριο είναι καύσιμο και πρώτη ύλη της χημικής βιομηχανίας. Εξάγεται από υπόγειες κοιλότητες στις οποίες βρίσκεται υπό υψηλή πίεση. Σε αυτές τις κοιλότητες το φυσικό αέριο σχηματίστηκε με τρόπο παρόμοιο με τον τρόπο σχηματισμού του πετρελαίου. Μεταφέρεται προς τους τόπους όπου πρόκειται να χρησιμοποιηθεί όπως είναι, χωρίς την ανάγκη περαιτέρω επεξεργασίας.

Τα κοιτάσματα φυσικού αερίου βρίσκονται συνήθως μακριά από τα κύρια κέντρα καταναλώσεως· συνεπώς πρέπει να μεταφερθεί, αν και οι βιομηχανίες χημικής επεξεργασίας είναι συχνά εγκατεστημένες στην περιοχή της παραγωγής. Η μεταφορά του φυσικού αερίου εξαρτάται από την

κατάστασή του. Σε αέρια κατάσταση μεταφέρεται με αγωγούς υπό υψηλή πίεση, ενώ σε υγρή κατάσταση μεταφέρεται με πλοία.

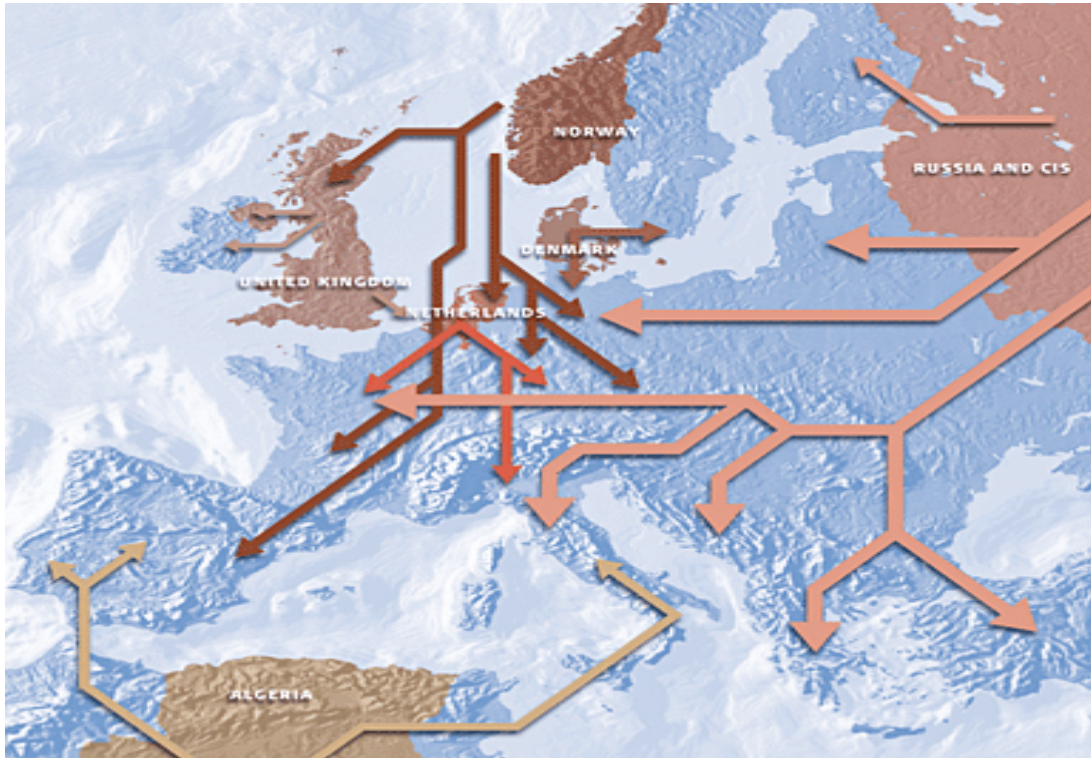
Οι μεγάλοι αγωγοί υψηλής πίεσης καθιστούν δυνατή τη μεταφορά του αερίου σε απόσταση χιλιάδων χιλιομέτρων. Παραδείγματα τέτοιων αγωγών είναι οι αγωγοί της Βόρειας Αμερικής, που εκτείνονται από το Τέξας και τη Λουιζιάνα μέχρι τη βορειοανατολική ακτή και από την Αλμπέρτα ως τον Ατλαντικό. Αγωγοί επίσης εκτείνονται από τη Σιβηρία μέχρι την Κεντρική και Δυτική Ευρώπη. Οι έρευνες για πετρέλαιο έχουν αποκαλύψει την ύπαρξη μεγάλων κοιτασμάτων αερίου στην Αφρική, Μέση Ανατολή, Αλάσκα και αλλού. Η μεταφορά από τέτοιες περιοχές γίνεται με πλοία. Το αέριο υγροποιείται στους -160 βαθμούς Κελσίου και μεταφέρεται, όπως το πετρέλαιο, με δεξαμενόπλοια ειδικά κατασκευασμένα για τον σκοπό αυτό. Ένα κυβικό μέτρο υγρού φυσικού αερίου αντιστοιχεί σε 600 κυβικά μέτρα αερίου σε ατμοσφαιρική πίεση. Το ειδικό βάρος του υγρού αερίου είναι σχετικά χαμηλό (περίπου 0,55). Η Ελλάδα προμηθεύεται φυσικό αέριο από την Ρωσία και την Αλγερία.

Στην εικόνα 1.1. απεικονίζεται ο παγκόσμιος χάρτης παραγωγής φυσικού αερίου.

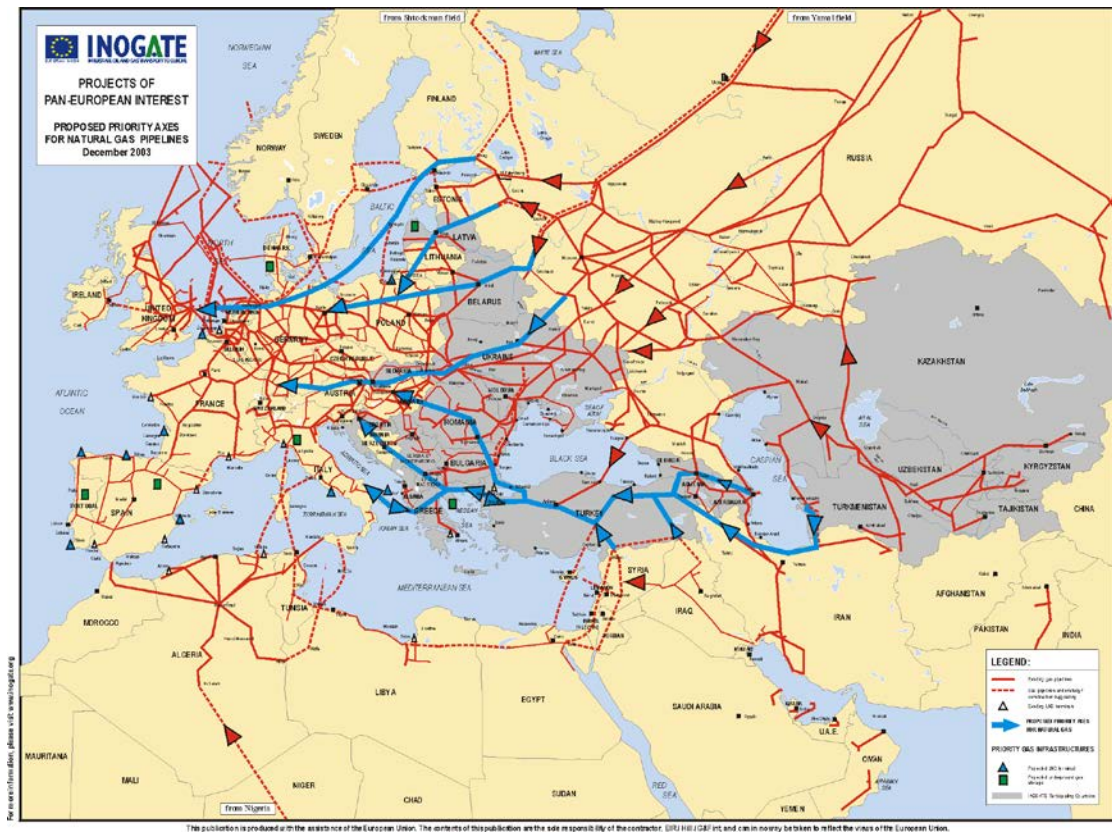


Εικόνα 1.1. Παγκόσμια παραγωγή φυσικού αερίου σε $m^3/\text{έτος}$ [16]

Οι κύριοι προμηθευτές φυσικού αερίου για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι η Ρωσία, η Νορβηγία και η Αλγερία. Στην παρακάτω εικόνα εικονίζεται σχηματικά η προμήθεια φυσικού αερίου της Ε.Ε. για τη δεκαετία 2010 – 2020.



Εικόνα 1. 2.. Κύριοι πάροχοι φυσικού αερίου στην Ευρώπη και αγωγοί μεταφοράς [17]



Εικόνα 1. 3. Δίκτυο διανομής Φ.Α. στην Ευρώπη [18]

1.2. Χρήσεις Φυσικού Αερίου

Το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται με αρκετούς τρόπους :

- Αποτελεί βασική πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Χρησιμοποιείται στην παραγωγή υδρογόνου.
- Χρησιμοποιείται ως καύσιμο οχημάτων.
- Οικιακή χρήση (μαγειρική, θέρμανση κ.α.)
- Άλλες χρήσεις όπως παραγωγή γυαλιού, υφασμάτων, ατσαλιού, πλαστικών, ειδών χρωματισμού κ.α.

Το φυσικό αέριο στον βιομηχανικό τομέα

Τα χαρακτηριστικά του φυσικού αερίου που ευνοούν τη χρήση του στο βιομηχανικό τομέα είναι κυρίως τα εξής :

- Είναι εφικτή η συνεχής παροχή καυσίμου. Κάτι τέτοιο εξασφαλίζει την απρόσκοπτη λειτουργία και αποδεσμεύει κεφάλαια που σε άλλες περιπτώσεις απαιτούνται για τη διατήρηση αποθεμάτων και αποθηκευτικών χώρων.
- Έχει μειωμένες, σε σχέση με άλλα καύσιμα, εκπομπές ρύπων. Έτσι η χρήση του συμβάλλει στο καθαρότερο περιβάλλον και στην καταπολέμηση του φαινομένου του θερμοκηπίου.
- Έχει μειωμένο λειτουργικό κόστος διαχείρισης καυσίμου και συντήρησης.
- Αυξημένη ενεργειακή απόδοση και οικονομία.
- Βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων.
- Ευχέρεια χειρισμού και ελέγχου.
- Αποκέντρωση θερμικών χρήσεων.

1.3. Πολιτικές και οικονομικές προεκτάσεις [2]

Όπως παρουσιάστηκε στις προηγούμενες εικόνες η παραγωγή και διανομή του φυσικού αερίου έχει δημιουργήσει νέες γεωπολιτικές και γεωστρατηγικές σχέσεις. Το μονοπώλιο παραγωγής αλλά και τα προβλήματα διασύνδεσης και διανομής, κυρίως λόγω αντικρουόμενων συμφερόντων μεταξύ γειτονικών χωρών, καθιστούν πολύ εύθραυστη τη διαρκή απαιτούμενη τροφοδοσία του φυσικού αερίου στην Ευρώπη. Το πλέον πρόσφατο γεγονός που επιβεβαιώνει αυτή την ευαισθησία είναι η τελευταία κρίση στις σχέσεις Ρωσίας – Ουκρανίας που είχε ως αποτέλεσμα την ολοσχερή διακοπή της τροφοδοσίας.



Εικόνα 1.4. Διασύνδεση Φ.Α. από τη Ρωσία στην Ευρώπη (2007) [19]

Πέραν της ευαισθησίας αυτής που αναφέρθηκε, ένα άλλο γεγονός καίριο για την εμπορία και χρήση του φυσικού αερίου είναι η μεταβολή της τιμής του. Οι τιμές φυσικού αερίου έχουν γενικά ακολουθήσει την άνοδο τιμών του πετρελαίου από το 2003. Ακόμα και στις ανταγωνιστικές αγορές, οι τιμές πετρελαίου επηρεάζουν τις τιμές του φυσικού αερίου, λόγω του ανταγωνισμού μεταξύ των προϊόντων. Οι αγορές φυσικού αερίου παραμένουν πάντως σε ένα βαθμό σε τοπικό επίπεδο. Εν τούτοις, κατά μέσο όρο κατά το πέρασμα των ετών, οι τοπικές τιμές συνήθως μεταβάλλονται σε γενικές γραμμές παράλληλα μεταξύ τους λόγω της σχέσης με τις τιμές του πετρελαίου.

Για τα ελληνικά δεδομένα και δει για αυτά της Αττικής, η τιμή του φυσικού αερίου διαμορφώνεται σε μηνιαία βάση σε συνάρτηση με τις τιμές των ανταγωνιστικών καυσίμων. Ενδεικτικά η τιμή του φυσικού αερίου για

χρήση θέρμανσης υπολογίζεται κάθε μήνα σε σχέση με το πετρέλαιο θέρμανσης ως εξής :

- i) Λαμβάνεται η μέση τιμή του πετρελαίου θέρμανσης (€/lt) του προηγούμενου μήνα (με φόρους και ΦΠΑ), βάσει τιμοληψίας που πραγματοποιεί σε μεγάλο αριθμό πρατηρίων καυσίμων, σε εβδομαδιαία βάση, στην Αττική.
- ii) Στην ανωτέρω τιμή του πετρελαίου θέρμανσης εφαρμόζεται καθορισμένη έκπτωση 20% έτσι ώστε η τελική τιμή χρέωσης του φυσικού αερίου να είναι πάντα 20% πιο οικονομική από την τελική τιμή του πετρελαίου θέρμανσης ανά μήνα (βάσει του ενεργειακού ισοδύναμου του πετρελαίου θέρμανσης).

Έτσι, με την άνοδο των τιμών του πετρελαίου επέρχεται και η άνοδος των τιμών του φυσικού αερίου. Αυτό καθιστά το κόστος εισαγωγής του Φυσικού Αερίου σημαντικό μέρος των εξόδων του προϋπολογισμού μιας χώρας. Πόσο μάλλον δε όταν αυτό συνδέεται με το μονοπωλιακό καθεστώς της παραγωγής του φυσικού αερίου.

Κεφάλαιο 2 – Παραγωγή SNG

2.1 Εισαγωγή

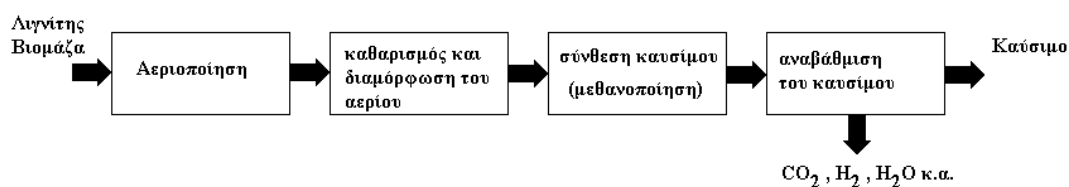
Μέχρι σήμερα, η παραγωγή καυσίμων και χημικών στις περισσότερες χώρες βασιζόταν στο πετρέλαιο και σε μικρότερο βαθμό στο φυσικό αέριο. Είναι γνωστό ότι τα αποθέματα πετρελαίου και φυσικού αερίου επαρκούν για τα επόμενα 40-60 χρόνια. Αντιθέτως, τα αποθέματα γαιάνθρακα θα διαρκέσουν για παραπάνω από 150 χρόνια (καθώς και η βιομάζα, ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας). Η εκτενέστερη διαθεσιμότητα, η επιθυμία για βελτίωση της ασφάλειας της δυνατότητας παροχής ενέργειας και η πιθανότητα μείωσης εκπομπών αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, είναι τα μεγαλύτερα κίνητρα για την εφαρμογή αυτών των (εγχώριων) πόρων.

Εκτός της ηλεκτροπαραγωγής και των υγρών καυσίμων, η μετατροπή των στερεών πρώτων υλών σε συνθετικό ή υποκατάστατο φυσικού αερίου (Synthetic/Substitute Natural Gas- SNG) είναι αντικείμενο εκτενούς έρευνας. Ένα αέριο ποικιλότροπης εφαρμογής, εναλλακτικό του φυσικού αερίου. Τα πλεονεκτήματα του SNG είναι η μεγάλη απόδοση του στη μετατροπή, η προϋπάρχουσα υποδομή για τη διακίνησή του, όπως δίκτυο σωληνώσεων κλπ, και οι καλές και αποδοτικές τεχνολογίες που βρίσκουν εφαρμογή, όπως CNG αυτοκίνητα (Compress Natural Gas), θέρμανση, μονάδες συμπαραγωγής και ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς. Ο γαιάνθρακας και η στερεή βιομάζα μπορούν να μετατραπούν σε SNG μέσω θερμοχημικών διαδικασιών όπως αεριοποίηση και συνακόλουθη μεθανοποίηση, φτάνοντας σε ολική χημική απόδοση πχ. του ξύλου σε SNG της τάξεως του 65% (χημική ενέργεια του SNG σε σύγκριση με την εισερχόμενη χημική ενέργεια του ξύλου). Έχει διαπιστωθεί ότι όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα του SNG σε μεθάνιο, αυξάνεται η ολική χημική ενέργεια και λιγότερη θερμότητα της αντίδρασης πρέπει να απελευθερωθεί στο στάδιο της μεθανοποίησης. Η

μετατροπή του μεθανίου επιτρέπει την εύκολη και οικονομικά αποδοτική απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα, μιας και ο διαχωρισμός του υψηλά συγκεντρωμένου διοξειδίου του άνθρακα ενυπάρχει σε όλες τις διαδικασίες του SNG.

2.2. Γενική περιγραφή παραγωγής SNG [3]

Η παραγωγή SNG μέσω θερμοχημικών διεργασιών απαιτούν αρκετές βαθμίδες μετασχηματισμού όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα:

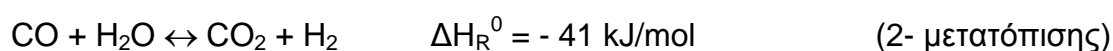


Εικόνα 2.1. Στάδια μετασχηματισμού και παραγωγής αερίου καυσίμου SNG

1. Το πρώτο βήμα είναι η αεριοποίηση του ορυκτού (λιγνίτης, βιομάζα κ.α.) με ατμό ή/και οξυγόνο και την παραγωγή του λεγόμενου 'συνθετικού' αερίου (syngas), αέριο που κατά κύριο λόγο περιέχει H₂, CO, CO₂, H₂O, CH₄ και κάποιους υψηλότερους υδρογονάνθρακες και ακαθαρσίες όπως θείο και στοιχεία χλωρίου. Η σύνθεση του παραγόμενου αερίου επηρεάζεται από την ευρεία έκταση στις τεχνολογίες αεριοποίησης, για παράδειγμα τον τύπο του αντιδραστήρα, το μέσο της αεριοποίησης, τις συνθήκες λειτουργίας κ.α.

2. Η επακόλουθη διαδικασία σύνθεσης του καυσίμου καθορίζει το εύρος των επιτρεπτών αερίων συνθέσεων και το μέγιστο βαθμό των ακαθαρσιών στην είσοδο. Ως εκ τούτου, ο καθαρισμός και η διαμόρφωση του αερίου είναι μείζονος σημασίας. Ο καθαρισμός του αερίου γίνεται αντιληπτός ως η μονάδα λειτουργίας στην οποία ακαθαρσίες και βλαβερές ουσίες των καταλυτών, όπως θείο και χλώριο, απομακρύνονται από το παραγόμενο αέριο. Αντιθέτως,

η διαμόρφωση του αερίου περιλαμβάνει όλες τις διεργασίες στις οποίες τα συστατικά του παραγόμενου αερίου μετατρέπονται με τέτοιο τρόπο, ώστε η τελική σύνθεση να' ναι κατάλληλη για την κύρια εφαρμογή/διάταξη (πχ. τη σύνθεση του καυσίμου). Τα πιο συνήθη στάδια διαμόρφωσης είναι η reforming αντίδραση με ατμό και η αντίδραση μετατόπισης νερού σε αέριο όπως παρουσιάζονται στις παρακάτω εξισώσεις:



Η σύνθεση του καυσίμου από μόνη της είναι ετερογενής καταλυτική διαδικασία. Στην υδρογόνωση των οξειδίων του άνθρακα σε μεθάνιο, δηλαδή στη μεθανοποίηση, εκτός από την μετατόπισης νερού σε αέριο (εξ.2), άλλες 2 ανεξάρτητες χημικές αντιδράσεις, εξίσου σημαντικές, λαμβάνουν χώρα:

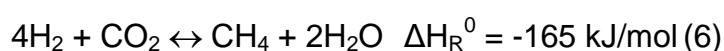
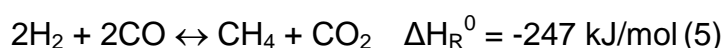


Αν η στοιχειομετρική αναλογία των αντιδρώντων υδρογόνου προς μονοξείδιο του άνθρακα (H_2/CO) είναι τουλάχιστον τρία (3), το μονοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με το υδρογόνο και έχουμε μεθάνιο και νερό (εξ. 3). Εν τούτοις, τα παραγόμενα αέρια από αεριοποίηση λιγνίτη (ή βιομάζας) έχουν συνήθως αναλογίες $H_2 : CO$ μεταξύ 0.3 και 2, οι οποίες είναι πολύ χαμηλές και αποτρεπτικές για καλή μετατροπή του CO και μεγάλη διάρκεια ζωής του καταλύτη. Διαμέσου της αντίδρασης μετατόπισης νερού σε αέριο (εξ. 2), η αναλογία H_2 / CO μπορεί να ρυθμιστεί με μετατροπή του CO με H_2O σε CO_2 και επιπρόσθετο H_2 .

Η αντίδραση Boudouard (εξ 4) είναι επίσης μείζονος σημασίας, μιας και ο άνθρακας στην επιφάνεια του καταλύτη μπορεί να θεωρηθεί ως απαραίτητο

μέσο κατά την αντίδραση της μεθανοποίησης, αλλά επίσης και ότι ο άνθρακας μπορεί να προκαλέσει απενεργοποίηση του καταλύτη με σχηματισμό κρυσταλλικών τριχιδίων άνθρακα, είτε πολυμερή ανθρακικά ιζήματα ή συμπύκνωση μεταλλικών κρυσταλλιτών.

Το μεθάνιο μπορεί επίσης να παραχθεί από υδρογόνωση οξειδίων του άνθρακα σε άλλες δύο χημικές αντιδράσεις:



Έχει παρατηρηθεί ότι αυτές οι δύο αντιδράσεις μπορούν να περιγραφούν και ως γραμμικός συνδυασμός των αντιδράσεων (2) και (3).

Η αντίδραση μετατόπισης νερού αερίου (εξ. 2) και οι αντιδράσεις (3)-(6) είναι εξώθερμες, όπως προκύπτει από τα ΔH_{R}^0 . Η μεθανοποίηση, με όλα της τα στοιχεία όπως θερμοδυναμική, μηχανισμός αντιδράσεων, κινηματικής και απενεργοποίησης, έχει ξεκινήσει να μελετάται σε βάθος από όταν οι Sabatier και Senderens ανακάλυψαν το 1902 ότι το νικέλιο και άλλα μέταλλα (Ru, Rh, Pt, Fe και Co) αποτελούν καταλύτες γι'αυτή την αντίδραση. Το νικέλιο ήταν και παραμένει ακόμα το υλικό επιλογής, εξαιτίας της ευκολίας του για συλλογή, της δράσης του και φυσικά της τιμής του. Παρόλα αυτά, αυτοί οι καταλύτες είναι πολύ ευπαθείς σε καταλυτικά 'δηλητήρια' όπως στοιχεία θείου (πχ H_2S , COS, οργανικό θείο) και χλώριο.

Από θερμοδυναμικής άποψης, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι η μεθανοποίηση ευνοείται από τις χαμηλές θερμοκρασίες και τις υψηλές πιέσεις. Κατά τη λειτουργία σε υψηλή πίεση παράγεται μεγάλη ποσότητα θερμότητας ανά μονάδα όγκου σε σύγκριση με την αντίστοιχη σε χαμηλή πίεση.

Η κύρια βιομηχανική εφαρμογή της μεθανοποίησης είναι η απομάκρυνση ιχνών CO από αέρια πλούσια σε υδρογόνο σε διατάξεις αμμωνίας. Όμως με στόχο την παραγωγή SNG από λιγνίτη, μαζούτ και νάφθα, η διαδικασία μεθανοποίησης διαφοροποιείται από το στάδιο του καθαρισμού ως την κύρια διαδικασία σύνθεσής του, κάτω από εντελώς διαφορετικές προϋποθέσεις.

Η αναβάθμιση του καυσίμου στο τέλος της διαδικασίας εξηγεί την απομάκρυνση όλων των ουσιών όπως νερό, διοξείδιο του άνθρακα κλπ, με στόχο να υλοποιήσει τις ποιοτικές απαιτήσεις του δικτύου του αερίου ή του βιοκαυσίμου.

Και τα τέσσερα αυτά στάδια βρίσκονται σε αλληλεξάρτηση · ο τύπος σύνθεσης του καυσίμου καθορίζει την ποιότητα του εισερχόμενου αερίου (που χεί προκύψει από αεριοποίησης) και κατ' επέκταση επηρεάζει την τεχνολογία της αεριοποίησης.

2.3. Ιστορική αναδρομή

Η περίοδος μετά τον 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο μέχρι τη δεκαετία του '70 είναι γνωστή και ως η «χρυσή περίοδος» για το φυσικό αέριο στις ΗΠΑ. Το 1950, το φυσικό αέριο παρείχετο σε ποσοστό γύρω στο 17% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης στις ΗΠΑ και η χρήση του εκτοξεύθηκε στο 30% στις δεκαετίες του '60 και του '70. Το '60, η αμερικάνικη κυβέρνηση και βιομηχανία ανησυχούσαν για μια πιθανή έλλειψη του φυσικού αερίου λόγω αυτής της ολοένα αυξανόμενης απαίτησης για παροχή και κατανάλωση. Οι αμερικάνικες αρχές θέσπισαν νέους κανονισμούς για τη χρήση και την τιμή του φυσικού αερίου και, το πιο σημαντικό, ξεκίνησαν έρευνες πάνω στην αποδοτική μεθανοποίηση λιγνίτη σε συνθετικό φυσικό αέριο.

Οι περισσότερες μελέτες και πειραματικές έρευνες του '60 χρηματοδοτήθηκαν και υλοποιήθηκαν στις ΗΠΑ. Τ' αποτελέσματα δημοσιεύθηκαν στο ετήσιο «Synthetic Pipeline Gas Symposium» στο Σικάγο, καθώς και στις τεχνολογικές αναφορές του Υπουργείου Ενέργειας.

Η πετρελαϊκή κρίση του '70 ενέτεινε την έρευνα και ανάπτυξη στις μεθόδους αεριοποίησης λιγνίτη και γαιανθράκων μαζί με την παραγωγή SNG. Εκτός από τις ΗΠΑ, τόσο η Γερμανία όσο και η Μεγάλη Βρετανία συμμετείχαν σ' αυτή την προσπάθεια. Αρκετά πειραματικά και πιλοτικά εργοστάσια κατασκευάστηκαν εκείνη την περίοδο, αλλά μόλις ένα εμπορικό εργοστάσιο παραγωγής SNG τέθηκε σε λειτουργία. Το «The Great Plains Synfuels Plant» της «Dakota Gasification Company» ιδρύθηκε το 1984 και έκτοτε παράγονται 4.8 Mio m³ SNG ημερησίως.

2.4. Αντιδραστήρες μεθανοποίησης

2.4.1. Μεθανοποίηση σε σταθερή κλίνη

Οι αντιδραστήρες μεθανοποίησης σταθερής κλίνης είναι στην επιφάνεια ως μονάδες καθαρισμού του αερίου, όπως για παράδειγμα οι διατάξεις αμμωνίας. Χρησιμοποιούνται για να εξαλείψουν μικρές συγκεντρώσεις CO με μεθανοποίηση σε ρεύματα πλούσια σε υδρογόνο, πριν την σύνθεση της αμμωνίας ώστε να αποφευχθεί η αδρανοποίηση των καταλυτών. Η απομάκρυνση της θερμότητας της αντίδρασης δεν είναι πρόβλημα σε αυτές τις εφαρμογές, εφόσον έχει δοθεί η θερμική χωρητικότητα για μεγάλους όγκους αερίων. Για την παρασκευή συνθετικού φυσικού αερίου, όμως, η θερμότητα της αντίδρασης πρέπει να ληφθεί υπόψη, λόγω του μεγάλου ποσοστού CO στο συνθετικό αέριο. Σ' αυτή την περίπτωση, αρκετοί αντιδραστήρες μεθανοποίησης συνδέονται σε σειρές με εργαζόμενο ψυκτικό μέσο ή παραγόμενο αέριο από ανακύκλωση.

2.4.2 Μέθοδος Lurgi

Τη δεκαετία του '60 και του '70 η μέθοδος αεριοποίησης της Lurgi ήταν η μόνη εμπορικά βιώσιμη και εφαρμόσιμη για την παραγωγή συνθετικού αερίου. Η Lurgi ανέπτυξε μια μονάδα μεθανοποίησης συμπεριλαμβανομένων δυο αδιαβατικών αντιδραστήρων σταθερής κλίνης εσωτερικής ανακύκλωσης.

Μια πιλοτική μονάδα σχεδιάστηκε και ανεγέρθη από τη Lurgi και τη SASOL στο Sasolburg της Ν.Αφρικής καθώς και μια δεύτερη πιλοτική μονάδα ανεγέρθηκε από τη Lurgi και την El Paso Natural Gas Corporation στο Schwechat της Αυστρίας. Στην πρώτη πιλοτική μονάδα, η διαδικασία της μεθανοποίησης μελετήθηκε χρησιμοποιώντας συνθετικό από μια μονάδα Fischer – Topsch. Το συνθετικό αέριο παράχθηκε σε ένα εμπορικό εργοστάσιο αεριοποίησης που περιελάμβανε έναν καθαριστή αερίου της Rectisol και έναν αντιδραστήρα μετατόπισης. Η δεύτερη πιλοτική μονάδα μετέτρεψε το συνθετικό αέριο από νάφθα σε μεθάνιο. Η μεθανοποίηση και στις δύο μονάδες αποτελείται από δύο αδιαβατικούς αντιδραστήρες σταθερής κλίνης με εσωτερική ανακύκλωση του αερίου. Και οι δύο μονάδες λειτούργησαν για 1.5 χρόνο χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικούς καταλύτες : α) έναν εμπορικό καταλύτη με 20% κ.β. Ni/Al₂O₃ και β) έναν ειδικό καταλύτη μεθανοποίησης της BASF πλούσιο σε νικέλιο. Το εγχείρημα με τον πρώτο καταλύτη επέφερε γρήγορη αδρανοποίηση του καταλύτη. Ο δεύτερος καταλύτης λειτούργησε για 4000 ώρες και ανήλθε στους 450°C, τη θερμοκρασία αδιαβατικής ισορροπίας.

Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα της Lurgi και Sasol, το πρώτο και μοναδικό εμπορικό εργοστάσιο παραγωγής SNG από γαιάνθρακα κατασκευάστηκε στη Βόρεια Ντακότα των ΗΠΑ. Η ανέγερσή του ανατέθηκε στη Dakota Gasification Company και αποτελείται από 14 αεριοποιητές σταθερής κλίνης μαζί με μια μονάδα μετατόπισης νερού-αερίου, καθώς και διαχωριστή διοξειδίου του άνθρακα και θείου. Στον υπό πίεση αεριοποιητή η ημερήσια παροχή ορυκτού καυσίμου είναι 18000 τόνοι λιγνίτη μαζί με οξυγόνο και ατμό. Το οξυγόνο παρέχεται από μια μονάδα διαχωρισμού του αέρα, αποτελούμενη από μοριακές μεμβράνες και μονάδα κρυογενούς διαχωρισμού. Μετά τον αντιδραστήρα μεθανοποίησης, το παραγόμενο αέριο συμπιέζεται και υφίσταται αφύγρανση, το CO₂ απομακρύνεται και το παραγόμενο SNG πλέον διανέμεται στο δίκτυο φυσικού αερίου. Από το 1999 το CO₂, που προκύπτει από την αναβάθμιση του παραγόμενου αερίου, έχει χρησιμοποιηθεί για την βελτίωση ανάκτησης πετρελαίου σε μια παρακείμενη πετρελαιοπηγή. [4]

2.4.3 Μεθανοποίηση σε ρευστοποιημένη κλίνη

Αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης είναι διαδεδομένοι για την καταλληλότητά τους για μεγάλης κλίμακας λειτουργία των ετερογενώς καταλυμένων αντιδράσεων με μεγάλη εξώθερμη ενέργεια. Η ανάμιξη ρευστοποιημένων στερεών έχει οδηγήσει σε ισόθερμες συνθήκες στον αντιδραστήρα, που επιτρέπει απλό και εύκολο έλεγχο της λειτουργίας. Η μετάδοση θερμότητας και μάζας είναι υψηλή, συγκρινόμενη με αυτή των fixed κλινών. Επιπλέον πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα εύκολης απομάκρυνσης, προσθήκης και ανακύκλωσης του καταλύτη συνεχώς κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Εν τούτοις όμως, ειδική προσοχή πρέπει να δοθεί στη φθορά και στην εισαγωγή των τμημάτων του καταλύτη.

2.5. Πρόσφατες εξελίξεις

Εδώ και περίπου 10 χρόνια η παραγωγή SNG από λιγνίτη και βιομάζα έχει έρθει ξανά στο προσκήνιο, λόγω της ανόδου των τιμών του φυσικού αερίου, της επιθυμίας για μικρότερη εξάρτηση εισαγωγής του και τέλος για μια ανανεώσιμη και εναλλακτική μορφή φυσικού αερίου (στην περίπτωση της βιομάζας).

SNG από λιγνίτη και γαιάνθρακες

Ειδικά οι ΗΠΑ έχουν δείξει ένα αξιοπρόσεκτο ενδιαφέρον σ' αυτή την εφαρμογή, γιατί έχουν πλούσια κοιτάσματα λιγνίτη, που επαρκούν για τα επόμενα 220 χρόνια, ίσως και περισσότερο. Μετατρέποντας αυτά τα εγχώρια κοιτάσματα σε φυσικό αέριο, θα μπορούσε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της ενεργειακής αγοράς καθώς και να συμβάλει στην ομαλοποίησή της. Το δεύτερο πλεονέκτημα της μετατροπής λιγνίτη σε SNG είναι η παραγωγή συγκεντρωμένου CO₂ ως παραπροϊόν του καθαρισμού του αερίου και/ή αναβάθμισής του χωρίς περαιτέρω κόσθη για τον διαχωρισμό του CO₂.

Σε μια οικονομία περιορισμένου άνθρακα, η διαχείριση του άνθρακα αυτού μέσω συλλογής και απομόνωσής του θα είναι κρίσιμος και σημαντικός παράγων για την οικονομική αποτίμηση της διαδικασίας παραγωγής SNG. Το CO₂ μπορεί να αποθηκευτεί σε μη ατμοσφαιρικές δεξαμενές (πχ σε εγκαταστάσεις βαθιά κάτω από το έδαφος ή στα βάθη των ωκεανών).

Κεφάλαιο 3. Μονάδα διαχωρισμού του αέρα στα στοιχεία του

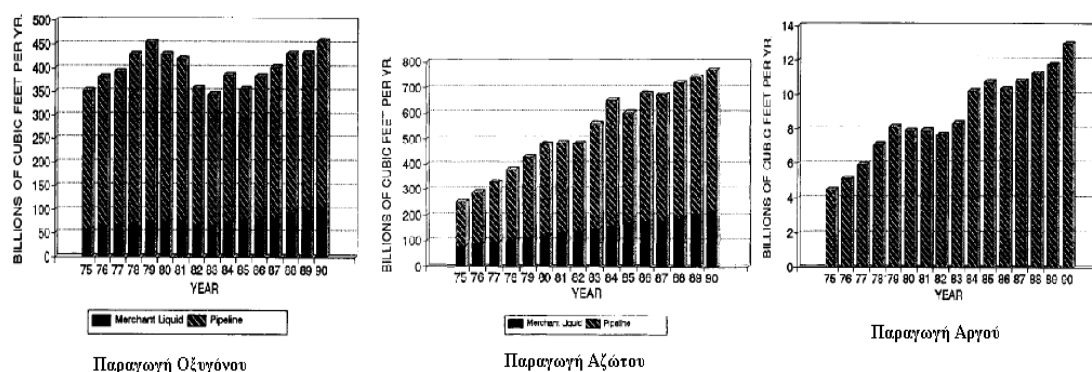
3.1. Ιστορική επισκόπηση

Οι επιστήμονες απομόνωσαν το οξυγόνο από τον αέρα το 1774. Δεν ανέπτυξαν όμως μια εμπορική μέθοδο για διαχωρισμό του αέρα στα αέρια στοιχεία του, μέχρι τα τέλη του 20^{ου} αιώνα. Ο γερμανός επιστήμων Carl Von Linde ανέπτυξε μια διαδικασία γνωστή ως κρυογενής απόσταξη (χαμηλής θερμοκρασίας). Αυτή η μέθοδος καθαρίζει και υγροποιεί τον αέρα σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Εξελιγμένα εργοστάσια μπορούν ν' απομονώσουν αυτά τα αέρια σε ποσοστό 99.9999%. Σήμερα, πολλές μικρότερες εγκαταστάσεις (αυτές που παράγουν 200 τόνους/μέρα) υιοθετούν εναλλακτικές μεθόδους για απομόνωση οξυγόνου και αζώτου από τον αέρα. Κάποιες από αυτές χρησιμοποιούν ειδικές μεμβράνες, οι οποίες επιλεκτικά φιλτράρουν τα αέρια..

[5] Τις προηγούμενες δύο δεκαετίες έχουν πραγματοποιηθεί εξελίξεις στην τεχνολογία διαχωρισμού του αέρα. Στις αρχές της δεκαετίας του 80' παράγονταν αποκλειστικά οξυγόνο, άζωτο και αργό με κρυογενή απόσταξη. Η παραγωγή αζώτου και οξυγόνου με απορρόφηση ήταν ήδη γνωστή, αλλά πρακτικά δεν είχε εφαρμοστεί ευρέως από τις κύριες βιομηχανίες παραγωγής αερίου. Η τεχνολογία με μεμβράνες ήταν η πρώτη για παραγωγή αζώτου, όμως το κόστος ήταν υψηλό και η ανθεκτικότητά της αβέβαιη. Αυτό καθιστά την κρυογενή τεχνολογία απόλυτη και είναι θέμα χρόνου μέχρι η μέθοδος απόσταξης του αέρα να αποτελεί «μουσειακό» είδος. Επί της ουσίας, οι κρυογενείς ήδη κυριαρχούν στις διατάξεις διαχωρισμού του αέρα και τα τελευταία 20 χρόνια έχουν γίνει αξιοσημείωτες πρόοδοι στην απόδοση των μεθόδων αυτών.

Το άζωτο και το αργό κατατάσσονται δεύτερο και τρίτο αντίστοιχα στην παραγωγή εμπορεύσιμων αέριων προϊόντων στις ΗΠΑ. Το 1989 η παραγωγή αζώτου και οξυγόνου ήταν 26.9 και 18.9 εκατομμύρια τόνοι αντίστοιχα. Οι ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις για τον διαχωρισμό μόνο του οξυγόνου φτάνουν περίπου στις 5 δισεκατομμύρια kWh ή ισοδύναμες με έναν σταθμό παραγωγής 600MW.

Στην εικόνα 3.1. παριστάνεται η παραγωγή αζώτου, οξυγόνου και αργού στις ΗΠΑ για την περίοδο 1975 – 1990.



Εικόνα 3.1. Παραγωγή οξυγόνου, αζώτου και αργού στις ΗΠΑ για την περίοδο 1975 - 1990 [5]

3.2. Προεπισκόπηση / Περιγραφή της μεθόδου

Οι διατάξεις διαχωρισμού του αέρα έχουν ως στόχο την παραγωγή βιομηχανικά χρήσιμων αέριων στοιχείων του ατμοσφαιρικού αέρα, όπως το άζωτο, το οξυγόνο και το αργό. Ενώ υπάρχει ποικιλία στις λεπτομέρειες της διαδικασίας διαχωρισμού και πληθώρα μεθοδολογιών, εν τούτοις οι δυο επικρατέστερες μέθοδοι είναι:

Α) η κρυογενής και η β) μη κρυογενής μέθοδος.

Οι κρυογενείς διατάξεις παράγουν άζωτο, οξυγόνο και αργό σε αέρια (κυρίως) και υγρή φάση, χρησιμοποιώντας τεχνολογία με αποστάξεις σε πάρα πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Οι κρυογενείς διατάξεις είναι οι πιο συνήθεις διατάξεις για παραγωγή υψηλής καθαρότητας αέριων προϊόντων σε

μέσες και υψηλές αποδόσεις. Αυτές βασίζονται στα διαφορετικά σημεία βρασμού των στοιχείων του αέρα για διαχωρισμό και καθαρότητά τους. Η μέθοδος αυτή εμπορευματοποιήθηκε τον 20^ο αιώνα. Μέχρι τότε, πολλές διαδικασίες είχαν εφαρμοστεί ωθούμενες από την ανάγκη παραγωγής ιδιαίτερων αερίων προϊόντων σε διάφορα επίπεδα καθαρότητας και πίεσης.

Όλες οι κρυογενείς διαδικασίες περιλαμβάνουν τα εξής στάδια:

- φιλτράρισμα και συμπίεση του αέρα
- απομάκρυνση ανεπιθύμητων ουσιών, όπως ατμούς νερού, διοξείδιο του άνθρακα κτλ
- ψύξη του αέρα μέχρι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες μέσω εναλλακτών θερμότητας και ψυκτικών εγκαταστάσεων
- απόσταξη του μερικώς συμπυκνωμένου αέρα (στους -185°C περίπου) για την παραγωγή των επιθυμητών προϊόντων
- θέρμανση των προϊόντων μέσω του εναλλάκτη

Τα στοιχεία της διάταξης που λειτουργούν σε πολύ χαμηλά θερμοκρασιακά επίπεδα (στήλες απόσταξης, σωληνώσεις, εναλλάκτες) πρέπει να'ναι καλά μονωμένα, για να ελαχιστοποιείται η ενεργειακή κατανάλωση και να αποφευχθούν λειτουργικά προβλήματα. Για την περάτωση αυτού, αυτά τα στοιχεία τοποθετούνται μέσα στη διάταξη καλά μονωμένα, σφραγισμένα σε δομές που ονομάζονται «κρύα κουτιά» . Αυτά μπορεί να'ναι κοίλα ή ορθογώνια και αναλόγως τον τύπο της διάταξης και τη χωρητικότητα αυτής μπορεί να εκτείνονται από 2 έως 4 μέτρα πλάτος και 15 έως 60 μέτρα ύψος.

Το αέριο οξυγόνο και άζωτο ,από τη μονάδα διαχωρισμού του αέρα, προκύπτουν σε θερμοκρασίες κοντά στην ατμοσφαιρική και σε σχετικά χαμηλή πίεση.

Οι μη κρυογενείς διατάξεις παράγουν αέριο άζωτο και οξυγόνο χρησιμοποιώντας διαδικασίες διαχωρισμού σε θερμοκρασίες κοντά σ' αυτή του περιβάλλοντος. Υπάρχουν δύο κύριες μη κρυογενείς διατάξεις. Η πρώτη με εκλεκτική απορρόφηση και η δεύτερη με ροή μέσα από μεμβράνες, για παραγωγή σχετικά καθαρών προϊόντων αζώτου και οξυγόνου. Αυτές οι

διαδικασίες βασίζονται σε διαφορές ιδιοτήτων των στοιχείων όπως η μοριακή δομή, η μοριακή μάζα, το μέγεθος των μορίων, ώστε να επιτευχθούν ο επιθυμητός βαθμός του διαχωρισμού.

Οι μη κρυογενείς διατάξεις είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες όταν δεν απαιτείται μεγάλη καθαρότητα αζώτου ή οξυγόνου (άζωτο καθαρότητας 98% - 99.5% ή οξυγόνο καθαρότητας 93%) και όταν οι απαιτήσεις παραγωγής για άζωτο και οξυγόνο είναι χαμηλές, για παράδειγμα για το άζωτο σε ποσότητες μικρότερες των 500 Nm³ και για οξυγόνο σε μικρότερες των 1500 Nm³.

Ερευνητικές μελέτες έχουν δείξει ότι από τις δύο ανωτέρω τεχνικές, αυτές που' ναι εφαρμόσιμες και αποδοτικές είναι οι κρυογενείς. Οι διάφορες μέθοδοι διαχωρισμού, οι οποίες παράγουν εμπορικά χρήσιμα προϊόντα στοιχεία του αέρα, βασίζονται στις διαφορές των σημείων βρασμού των στοιχείων αυτών (κρυογενικής απόσταξη) ή στις διαφορές των μοριακών μαζών και μεγεθών (μη κρυογενής απόσταξη). Οι μη κρυογενείς διατάξεις είναι ενεργειακά λιγότερο αποδοτικές από τις κρυογενείς, αλλά μπορεί να κοστίζουν λιγότερο για να κατασκευαστούν, ειδικά όταν οι απαιτήσεις παραγωγής είναι μικρές. Επίσης είναι και οι πιο κατάλληλες για λιγότερης καθαρότητας απαιτούμενα προϊόντα. Αυτό ισχύει επειδή το μέγεθος της εγκατάστασης είναι ανάλογο της επιθυμητής καθαρότητας των προϊόντων. Δηλαδή, για μικρή καθαρότητα, έχουμε μικρής έκτασης και μεγέθους εγκαταστάσεις. Επίσης, οι μη κρυογενείς εγκαταστάσεις έχουν γρήγορη και εύκολη εκκίνηση λειτουργίας, το οποίο και είναι θετικό όταν η παραγωγή των προϊόντων δεν είναι συνεχής.

Οι μη κρυογενείς διαδικασίες περιλαμβάνουν τις εξής τεχνολογίες για διαχωρισμός και για απομάκρυνση ανεπιθύμητων στοιχείων του αέρα είναι

- Η προσρόφηση με στραγγαλισμό πίεσης, γνωστή ως PSA (Pressure Swing Absorption) για παραγωγή οξυγόνου ή αζώτου
- Η προσρόφηση με στραγγαλισμό πίεσης κενού, γνωστή ως VPSA (Vacuum Pressure Swing Absorption) που χρησιμοποιείται για παραγωγή οξυγόνου

- Ο διαχωρισμός με μεμβράνες (Membrane Separation)

Αυτές παράγουν οξυγόνο, το οποίο είναι τυπικά 90-95 % καθαρότητας, και άζωτο 95 – 99.5% καθαρότητας.

Ο κρυογενής διαχωρισμός είναι μια μέθοδος καταξιωμένη για αποδοτική παραγωγή αερίων στοιχείων του αέρα σε υψηλά ποσοστά καθαρότητας. Η ψυκτική ισχύς που καταναλώνεται κατά τη μέθοδο του διαχωρισμού χρησιμοποιείται και επαναχρησιμοποιείται σε ευρεία έκταση. Η κύρια ψυκτική ισχύς καταναλώνεται για την υγραποίηση του αέρα, πριν την είσοδό του στη στήλη απόσταξης, στον κύριο εναλλάκτη θερμότητας. Σε γενικές γραμμές τα ρεύματα αέρα και νερού που εισέρχονται στην ASU σε συνθήκες περιβάλλοντος. Ενώ στην έξοδό τους εξέρχονται σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Η διαδικασίες παραγωγής αερίου οξυγόνου και αζώτου είναι λιγότερο πολύπλοκες, σε σύγκριση μ'αυτές που παράγουν και υπόλοιπα αέρια όπως το αργό, αφού τότε θα χρειάζονταν περισσότερες στήλες απόσταξης. Αν τ' αέρια πρέπει να υγραποποιηθούν, περαιτέρω μηχανισμοί ψύξης είναι κατά συνέπεια αναγκαίοι για ν' αντισταθμίσουν την απώλεια ψυκτικής ισχύος, όταν δεν εναλλάσσεται θερμότητα μεταξύ του κρύου υγρού και του κατ' αντιροή εισερχόμενου αέρα. Σε μια εγκατάσταση παραγωγής μόνο αερίων προϊόντων, τα εξερχόμενα αέρια χρησιμοποιούνται για ψύξη του εισερχόμενου αέρα, μέχρι σημείο υγραποίησης του, με αποτέλεσμα να μη χρειάζεται πρόσθετο ψυκτικό φορτίο για ν' αντισταθμίσει τις απώλειες. Πρόσθετο ψυκτικό φορτίο είναι απαραίτητο κατά την έναρξη λειτουργίας της εγκατάστασης και παρέχεται από μεγάλες δεξαμενές υγρού αζώτου. Η μικρή ψυκτική απώλεια στον κύριο εναλλάκτη θερμότητας αντισταθμίζεται από έναν στρόβιλο εκτόνωσης.

3.3. Προσομοίωση του μοντέλου λειτουργίας της ASU στο IPSEpro™ [6]

Οι εμπορικές ASU παράγουν οξυγόνο καθαρότητας 99,7 % . Όταν έχουμε παραγωγή σε μικρότερη καθαρότητα, απαιτείται λιγότερη ενέργεια για τη συμπίεση του αέρα. Ένας συντελεστής διόρθωσης τοποθετείται ώστε να ποσοτικοποιήσει την ενεργειακή κατανάλωση για καθαρότητες μικρότερες της 99,7%. Ο συντελεστής διόρθωσης μειώνει την κατανάλωση ενέργειας στην ASU καθώς αντισταθμίζει τα μικρότερα επίπεδα συμπίεσης και ποσότητας του αέρα που απαιτείται.

Η κάτωθι συνάρτηση από τη Linde AG δίνει τις τιμές του συντελεστή αυτού, με P_x την πίεση για το «x» ποσοστό καθαρότητας και P_0 την ατμοσφαιρική πίεση. Οι $U_{99,7}$ και U_x είναι μεταβλητές για καθαρότητα 99.7% και x% αντίστοιχα. Αυτές εκφράζουν το ποσοστό παραγωγής οξυγόνου σε οξυγόνο.

$$C = \left(\frac{U_{99,7}}{U_x} \right) \cdot \left[\frac{\ln\left(\frac{P_x}{P_0}\right)}{\ln\left(\frac{P_{99,7}}{P_0}\right)} \right]$$

Κάτω από καθαρότητα 95% όλο το οξυγόνο του αέρα γίνεται παραγόμενο προϊόν αλλά άνω του 95% ένα μέρος του οξυγόνου του αέρα εξέρχεται ως απορριπτόμενο αέριο. Ως εκ τούτου, όλη η ποσότητα οξυγόνου του αέρα που εισέρχεται στην ASU δεν μετατρέπεται σε παραγόμενο προϊόν και το ποσοστό οξυγόνου σε οξυγόνο ελαττώνεται.

Οι συντελεστές διόρθωσης για κάθε ποσοστό καθαρότητας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 3.1:

Πίνακας 3.1. Συντελεστής διόρθωσης για καθαρότητα οξυγόνου (Hult et al.,2001)

Purity %	Correction factor	$\frac{U_{99,7}}{U_x}$	U_x	P_x (bar)	P_0 (bar)	$P_{99,7}$ (bar)
90,0	0,899	0,984	1,000	5,02	1,013	5,851
91,0	0,909	0,984	1,000	5,117	1,013	5,851
92,0	0,919	0,984	1,000	5,212	1,013	5,851
93,0	0,930	0,984	1,000	5,310	1,013	5,851
94,0	0,940	0,984	1,000	5,412	1,013	5,851
95,0	0,951	0,984	1,000	5,518	1,013	5,851
96,0	0,964	0,986	0,998	5,628	1,013	5,851
98,0	0,985	0,989	0,995	5,811	1,013	5,851
99,7	1,000	1,000	0,984	5,851	1,013	5,851

Η παροχή αέρα για επίτευξη 99, 7% καθαρότητας οξυγόνου υπολογίζεται, ώστε να' χουμε ποσοτικοποιημένη την κατανάλωση ισχύος στους συμπιεστές. Ο συντελεστής αέρα (air factor) για καθαρότητα 99.7% είναι 4.855 και η ποσότητα οξυγόνου $451100 \text{ m}^3_n / \text{hr}$. Η παροχή αέρα για τις υπόλοιπες καθαρότητες οξυγόνου διαιρείται με τον air factor καθαρότητας 99.7% . Πολλαπλασιάζοντας τον συντελεστή αέρα για 99.7% καθαρότητα με το κλάσμα $U_{99.7}/U_x$ παίρνουμε τους νέους συντελεστές αέρα, για τις διάφορες καθαρότητες οξυγόνου που επιθυμούμε.

Ενδεικτικό παράδειγμα φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 3.2. για απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου $451100 \text{ m}^3/\text{hr}$ ($176.6 \text{ kg}/\text{sec}$).

Πίνακας 3.2. Υπολογιζόμενη παροχή αέρα, για παροχή οξυγόνου 451100 m³/hr, συναρτήσει της καθαρότητάς του

Καθαρότητα %	Απαιτούμενος αέρας (m ³ /hr)	Απαιτούμενος αέρας (kg/sec)
90,0	1830449	649,6036
91,0	1830449	649,6036
92,0	1830449	649,6036
93,0	1830449	649,6036
94,0	1830449	649,6036
95,0	1830449	649,6036
96,0	1834170	650,9240
98,0	1839750	652,9045
99,7	1860213	660,1663

Το πρώτο βήμα είναι το φιλτράρισμα και η συμπίεση του αέρα περιβάλλοντος μέχρι κάποιο επίπεδο πίεσης. Η ολική συμπίεση πραγματοποιείται σε 4 στάδια συμπίεσεων με ενδιάμεσες ψύξεις. Η τελική πίεση του αέρα, εξαρτάται από την καθαρότητα των προϊόντων και είναι άμεσα συνυφασμένη με τη στήλη απόσταξης. Το επίπεδο συμπίεσης ενδείκνυται στα 5-6 bar και τα ενδιάμεσα στάδια συμπίεσης τον παρακάτω κανόνα: $P_1 = \sqrt[4]{P_{tot}}$ και μετά $P_2 = P_1^2$, $P_3 = P_1^3$.

Έτσι πχ για $P_{tot} = 5.5$ bar έχουμε $P_0 = 1.013$ bar, $P_1 = 1.531$ bar, $P_2 = 2.344$ bar,

$P_3 = 3.588$ bar.

Οι ενδιάμεσες ψύξεις έγιναν με νερό στους 15° C και έξοδό από τον εναλλάκτη στους 24° C.

Πριν την τελική του είσοδο στον Κύριο Εναλλάκτη Θερμότητας, ο αέρας υφίσταται επιπλέον ψύξη στους 20° C με νερό περιβάλλοντος στους 15° C. Αυτό γίνεται ώστε να απομακρυνθούν οι φυσαλίδες νερού που πιθανόν να 'χουν σχηματιστεί κατά τη συμπίεση του αέρα.

Μοριακό «Κοσκίνισμα» :

Οι μοριακές μεμβράνες χρησιμοποιούνται για απομάκρυνση των ακαθαρσιών (υδρογονάνθρακες και διοξείδιο του άνθρακα) που έχουν παραμείνει στον αέρα καθώς και του υδρατμού από τις προηγούμενες συμπίεσεις. Αυτό επιτυγχάνεται με προσρόφηση. Αυτές οι ακαθαρσίες μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στη κρυογενή διαδικασία. Οι μεμβράνες αποτελούνται από ζεολίτες. Η θερμότητα για την προσρόφηση απελευθερώνεται όταν ο υδρατμός απορροφάται από τους ζεολίτες και η θερμοκρασία του ρεύματος του αέρα φτάνει και πάλι στους 20 °C. Τα κόσκινα λειτουργούν κατά ζεύγη, όπου το ένα φιλτράρει ενώ το άλλο ανανεώνεται. Όταν ανανεώνεται το κόσκινο, ξηρό άζωτο σε θερμοκρασία 150° C διέρχεται μέσα από αυτό. Ως εκ τούτου οι ζεολίτες αφυγραίνονται ενώ οι ακαθαρσίες μεταφέρονται έξω από το κόσκινο. Συνήθως, ηλεκτρικοί θερμαντές χρησιμοποιούνται για να προσδώσουν αυτή τη θερμοκρασία στο άζωτο.

Κύριος Εναλλάκτης Θερμότητας

Για να υγρατοποιήσουμε τον συμπιεσμένο αέρα, αυτός πρέπει να ψυχθεί μέχρι το σημείο τήξης του, το οποίο είναι περίπου στους -180 ° C. Αυτό επιτυγχάνεται με ανταλλαγή θερμότητας του εισερχόμενου αέρα με τα κρύα ρεύματα αέρα των προϊόντων αερίων . Ανάλογα με την θερμοκρασιακή διαφορά των εισερχόμενων και των εξερχόμενων ρευμάτων, ο αέρας ψύχεται από τους 20 ° C στους -180 ° C.

Μονάδα Απόσταξης

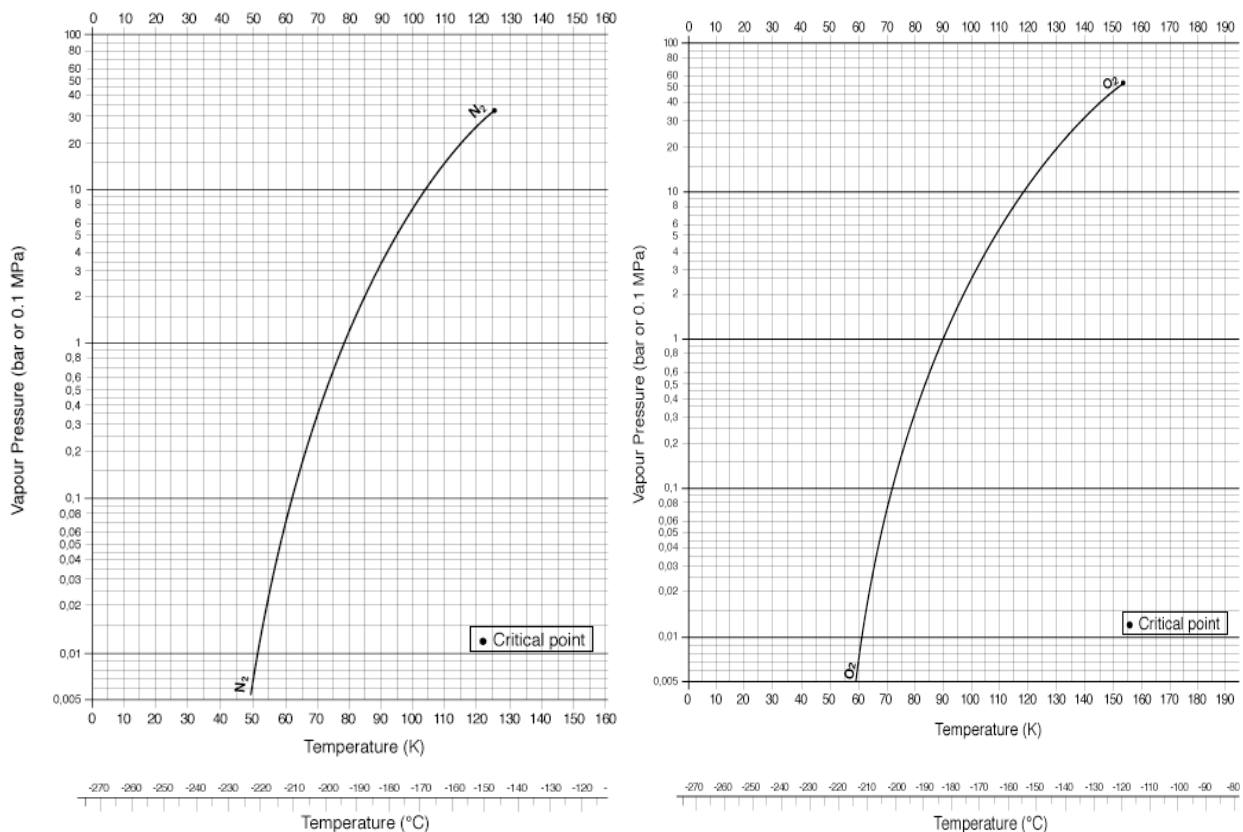
Η μονάδα απόσταξης είναι μια διάταξη με 2 στήλες απόσταξης, υψηλής και χαμηλής πίεσης αντίστοιχα. Στο κάτω μέρος της μονάδας βρίσκεται η στήλη υψηλής πίεσης και στο πάνω μέρος η στήλη χαμηλής. Η υψηλής πίεσης στήλη περιλαμβάνει έναν συμπυκνωτή στην κορυφή της και ο αέρας εισέρχεται σ' αυτή από το κάτω μέρος της. Ο συμπυκνωτής αυτός παίζει το ρόλο του ατμοποιητή για την χαμηλή πίεσης στήλη, έτσι ώστε το οξυγόνο στην χαμηλής πίεσης να εξαερώνεται από το θερμότερο άζωτο στην υψηλής

πίεσης στήλη. Προφανώς, η θερμοκρασιακή διαφορά στον «εναλλάκτη» αυτό μεταξύ του εξαμιζόμενου οξυγόνου και του συμπυκνωμένου αζώτου οδηγεί σε κάποιες ενεργειακές απώλειες.

Ο αέρας τροφοδοτείται στη στήλη υψηλής πίεσης σε θερμοκρασία κατ' ελάχιστον άνω της θερμοκρασίας τήξης. Λόγω του ότι το άζωτο ατμοποιείται σε χαμηλότερη θερμοκρασία απ' ότι το οξυγόνο, το καθαρό άζωτο θα αναδυθεί στην κορυφή της στήλης. Έτσι, το άζωτο συμπυκνώνεται και τροφοδοτεί το πάνω τμήμα της στήλης υψηλής πίεσης. Ένα ρευστό πλούσιο σε οξυγόνο καθαρότητας 35 – 40 % θα σχηματιστεί στον πυθμένα της στήλης υψηλής πίεσης. Αυτό το ρευστό πλούσιο σε οξυγόνο κατόπιν τροφοδοτεί το μέσον της στήλης χαμηλής πίεσης (πάνω μέρος της διάταξης) αφού έχει εκτονωθεί η πίεσή του σε περίπου 1.3- 1.5 bar.

Δεν υπάρχει συμπυκνωτής στις χαμηλής πίεσης στήλη. Το άζωτο επανακυκλοφορεί στο πάνω μέρος της στήλης και σκοπό έχει την ψύξη των ανερχόμενων αερίων, έτσι ώστε το οξυγόνο να συμπυκνώνεται. Έτσι στη στήλη αυτή το υψηλής καθαρότητας άζωτο ανέρχεται και αποτελεί το προϊόν αέριο από την κορυφή της. Στον πυθμένα της στήλης αυτής παραλαμβάνεται/εξέρχεται οξυγόνο υψηλής καθαρότητας. Αυτό το υγρό ατμοποιείται από το άζωτο που βρίσκεται στην υψηλής πίεσης στήλη (μέσω του συμπυκνωτή/ατμοποιητή που βρίσκεται ανάμεσα στις στήλες).

Ανακεφαλαιώνοντας, το υγρό οξυγόνο πρέπει ν' ατμοποιηθεί ενώ ταυτόχρονα το αέριο οξυγόνο συμπυκνώνεται ώστε να λειτουργήσει η διπλή αυτή στήλη. Αυτό δεν μπορεί να γίνει σε ατμοσφαιρική πίεση μιας και το υγρό άζωτο έχει χαμηλότερο σημείο τήξης (-196 °C) από το υγρό οξυγόνο (- 183 °C) . Είναι προφανές, λοιπόν, ότι δεν μπορεί να γίνει μεταφορά θερμότητας από ένα ψυχρό σ'ένα θερμό μέσο. Όμως, αυξάνοντας την πίεση του αζώτου, η θερμοκρασία συμπύκνωσης παρομοίως αυξάνεται όπως φαίνεται από την εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2. Καμπύλες μεταβολής σημείου βρασμού για άζωτο και οξυγόνο αντίστοιχα

Τα διαγράμματα δίνουν την απόλυτη πίεση σε bar σε συνάρτηση με το σημείο βρασμού του οξυγόνου και του αζώτου. Η πίεση στη χαμηλής πίεσης στήλη είναι της τάξης των 1.3 – 1.5 bar. Αυτή είναι η χαμηλότερη δυνατή πίεση μιας και αυτό το επίπεδο πίεσης απαιτείται για να κινηθεί το άζωτο στη χαμηλής πίεσης στήλη και στην υπόλοιπη εγκατάσταση. Για να μεταφερθεί θερμότητα από το αέριο άζωτο στο υγρό οξυγόνο απαιτείται κατ'ελάχιστον θερμοκρασιακή διαφορά 2 βαθμών.

Η εξάρτηση από θερμοκρασία και πίεση είναι απαραίτητη για την κρυογενή διαδικασία και οριοθετεί τις δυνατότητες βελτιστοποίησης της ASU. Η πίεση στη στήλη υψηλής πίεσης θέτει τις ενεργειακές ανάγκες για συμπίεση του αέρα και δεν μπορεί να μειωθεί αν δεν υπάρξουν βελτιώσεις στον κύριο εναλλάκτη θερμότητας ή βελτιώσεις από την απώλεια πίεσης καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Η απόδοση αυτού του τύπου εναλλάκτη θερμότητας

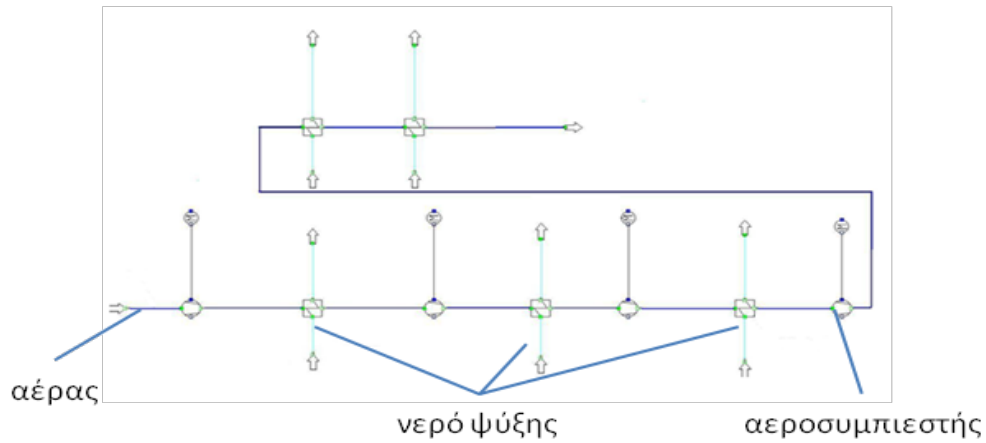
βρίσκεται συνέχεια σε διαδικασία βελτίωσης, πράγμα που θα αυξήσει την ενεργειακή απόδοση της ASU στο μέλλον. Οι απώλειες πίεσης στο πάνω τμήμα της μονάδας απόσταξης έχουν μειωθεί τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιώντας νέα τεχνική, στην οποία η απώλεια πίεσης για το άζωτο στο πάνω μέρος είναι γύρω στα 0.15 bar. Αυτή η απώλεια πίεσης είναι ουσιώδης, μιας και καθορίζει τα επίπεδα πίεσης σ' όλη την υπόλοιπη εγκατάσταση.

Όπως σημειώθηκε παραπάνω, όταν μια μονάδα διαχωρισμού χρησιμοποιείται για παραγωγή 95% καθαρότητας οξυγόνου, λιγότερη ενέργεια απαιτείται σε σχέση με την παραγωγή 99.7% καθαρότητας. Αυτός ο διαχωρισμός είναι απλούστερος, γιατί μόνο τα κύρια προϊόντα, οξυγόνο και άζωτο πρέπει να παραχθούν, σε σύγκριση με το υψίστης καθαρότητας οξυγόνο όπου το αργό πρέπει ομοίως να διαχωριστεί από το οξυγόνο. Η καθαρότητα του οξυγόνου ελέγχεται από τη ροή ατμών οξυγόνου στη στήλη χαμηλής πίεσης.

Η παραγωγή ατμών εξαρτάται από την ποσότητα αζώτου που συμπυκνώνεται στη στήλη υψηλής πίεσης, η οποία, με τη σειρά της εξαρτάται από την ποσότητα του αέρα που εισέρχεται στη στήλη αυτή. Ο μόνος τρόπος ελέγχου της ροής του ατμών οξυγόνου στο πάνω τμήμα της διάταξης (χαμηλής πίεσης) είναι με ρύθμιση της εξόδου του ατμών οξυγόνου στο τμήμα αυτό. Αυτό συμβαίνει λόγω συνεχούς παροχής αέρα στο κάτω τμήμα (υψηλής πίεσης). Για να πάρουμε υψηλής καθαρότητας οξυγόνο, μεγάλη ποσότητα ατμού χρειάζεται μιας και το οξυγόνο ωθεί το άζωτο προς το πάνω τμήμα της στήλης υψηλής πίεσης. Αυτό σημαίνει ότι μικρότερη έξοδος οξυγόνου επιτρέπεται για υψηλής καθαρότητας παραγωγή, σε σύγκριση με καθαρότητα μικρότερου ποσοστού.

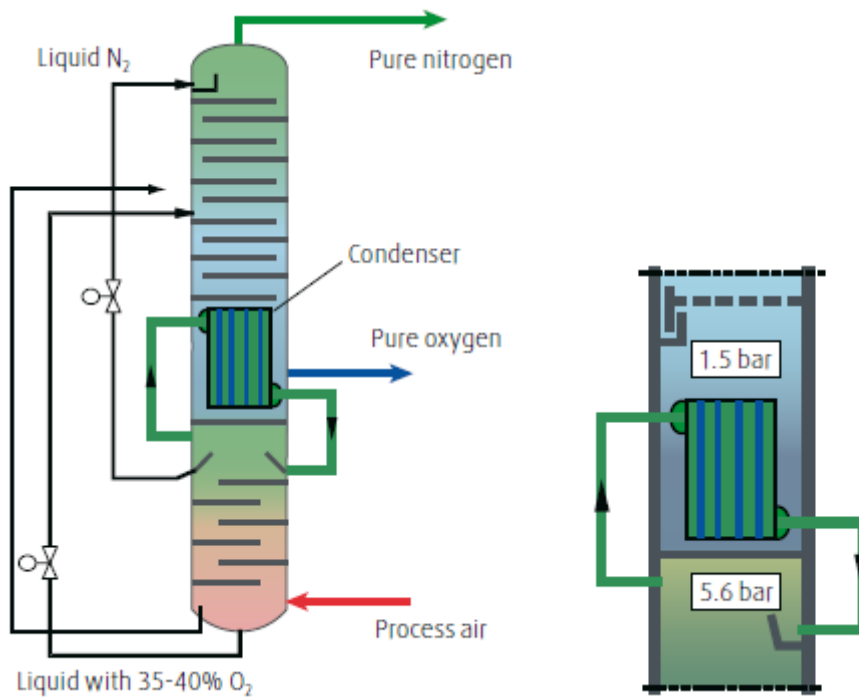
Για καθαρότητα 95% έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερο σημείο βρασμού για το υγρό οξυγόνο, το οποίο σημαίνει ότι η θερμοκρασία συμπύκνωσης του αζώτου δύναται να μειωθεί στη στήλη υψηλής πίεσης και κατ' επέκταση μειώνεται ο λόγος πίεσης στην εγκατάσταση, με αποτέλεσμα μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση.

Η διαδικασία συμπίεσεων μ' ενδιάμεσες ψύξεις, όπως μοντελοποιήθηκε στο IPSEpro™ φαίνεται παραστατικά στην εικόνα 3.3.

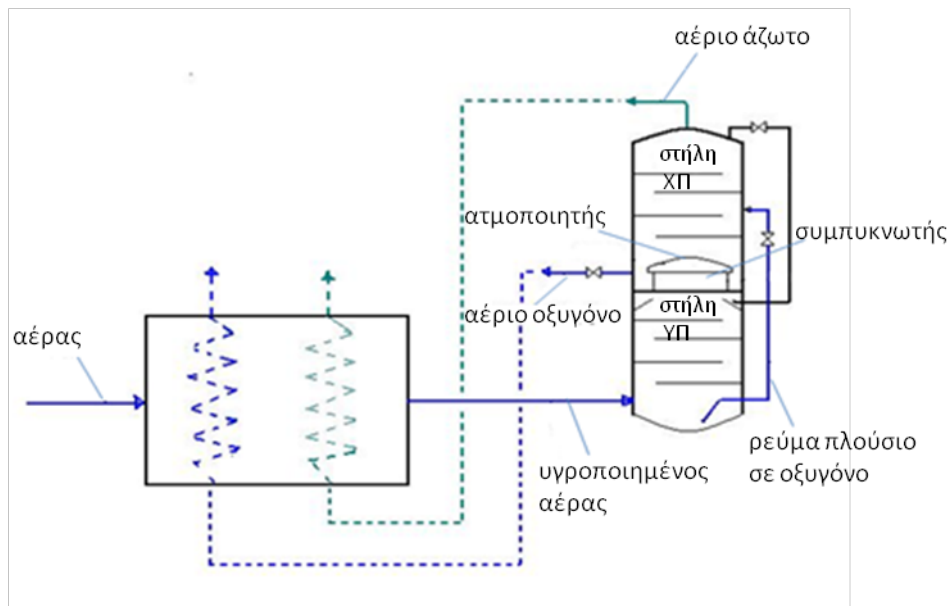


Εικόνα 3.3. Κύκλωμα συμπίεσεων αέρα με ενδιάμεσες ψύξεις στο IPSEpro™

Το τελικό ρεύμα αέρα εισέρχεται στο «κουτί» Κύριου Εναλλάκτη με θερμοκρασία 20 °C και εξέρχεται από αυτόν σε θερμοκρασία υγροποίησης του αέρα, ανάλογα με την συμπίεσή του από την προηγούμενη διάταξη. Η θερμοκρασία αυτή κυμαίνεται γύρω στους -180 ° C. Η πίεση αυτή είναι η απαιτούμενη ώστε κατόπιν, στη στήλη απόσταξης, να λειτουργήσει ο μηχανισμός εξαέρωσης και συμπύκνωσης και να πάρουμε τα επιθυμητά προϊόντα.



Εικόνα 3.4. Στήλη διπλής απόσταξης και ατμοποιητής/συμπυκνωτής [7]

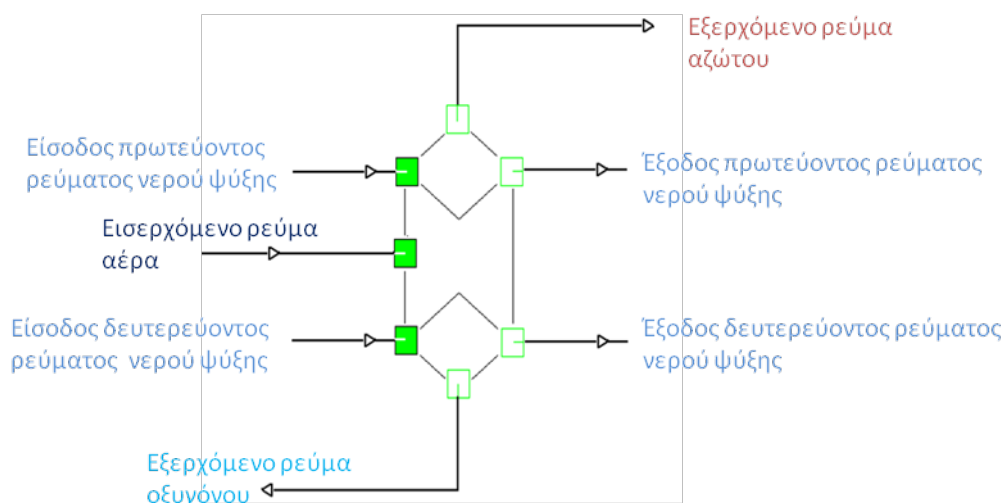


Εικόνα 3.5. Ο κύριος εναλλάκτης θερμότητας και η διπλή στήλη απόσταξης για την απαιτούμενη ανταλλαγή θερμότητας.

Για τους υπολογισμούς των ρευμάτων στο παραπάνω κύκλωμα εργαστήκαμε με την εξής λογική:

- 1) Η πίεση εισόδου και εξόδου του εναλλάκτη εξαρτάται από την επιθυμητή καθαρότητα των προϊόντων. Αυτή είναι κοντά στην πίεση υγροποίησης του αέρα.
- 2) Σ'αυτή την πίεση υπολογίζουμε τη θερμοκρασία ατμοποίησης του αζώτου και είναι η θερμοκρασία του
- 3) Η θερμοκρασία του οξυγόνου είναι κατά 2 βαθμούς πιο χαμηλή. Έτσι, με δεδομένη τη θερμοκρασία του οξυγόνου, βρίσκουμε από το διάγραμμα τις τάσεις ατμών του. Αυτή η πίεση είναι και η πίεση στο πάνω τμήμα της διάταξης, δηλαδή το τμήμα χαμηλής πίεσης.
- 4) Από ισολογισμό ενέργειας στη στήλη απόσταξης και με δεδομένα θερμοκρασίες και πιέσεις στην είσοδο του αέρα και έξοδο του οξυγόνου καθώς και τη σταθερή αναλογία μαζών m_{air} / m_{O_2} , μπορούμε να υπολογίσουμε την ενθαλπία του εξερχόμενου αζώτου.
- 5) Με δεδομένη πλέον την ενθαλπία και πίεση του εξερχόμενου αζώτου, υπολογίζουμε τη θερμοκρασία του.
- 6) Από ισολογισμό ενέργειας στον Κύριο Εναλλάκτη Θερμότητας, καταλήγουμε σε σχέση που μας δίνει την ενθαλπία εξόδου από αυτόν του ρεύματος οξυγόνου σε συνάρτηση με την ενθαλπία του εξερχόμενου αζώτου.
- 7) Έτσι, για επιθυμητή θερμοκρασία οξυγόνου, έχουμε την αντίστοιχη θερμοκρασία του αζώτου και αντίστροφα.

Έτσι λοιπόν προκύπτει το παρακάτω σχήμα του IPSE Pro



Εικόνα 3.6 Μοντέλο μονάδας διαχωρισμού του αέρα όπως σχεδιάστηκε στο IPSEproTM

- Τα ρεύματα « είσοδος πρωτεύοντος ρεύματος νερού ψύξης» και «είσοδος δευτερεύοντος ρεύματος νερού ψύξης» είναι ρεύματα εισερχόμενου νερού, θερμοκρασίας 15° C και χρησιμοποιούνται για τις ενδιάμεσες ψύξεις του αέρα
- Το ρεύμα «εισερχόμενου αέρα» είναι το ρεύμα αέρα που εισέρχεται στη διάταξη, θερμοκρασίας 20° C.
- Τα ρεύματα «εξερχόμενο ρεύμα οξυγόνου» και «εξερχόμενο ρεύμα αζώτου» είναι τα παραγόμενα ρεύματα οξυγόνου και αζώτου. Οι θερμοκρασίες και πιέσεις τους καθορίζονται από τον προηγούμενο ισολογισμό και ανάλογα με την απαιτούμενη καθαρότητα του οξυγόνου. Οι καθαρότητες του οξυγόνου που έχουν υπολογιστεί είναι 90 – 96 %, 98% και 99,7 %.
- Τα ρεύματα «έξοδος πρωτεύοντος νερού ψύξης» και «έξοδος δευτερεύοντος νερού ψύξης» είναι οι έξοδοι του ψυκτικού νερού.

Κεφάλαιο 4. Αεριοποίηση

4.1. Γενικά περί αεριοποίησης

4.1.1. Αεριοποίηση

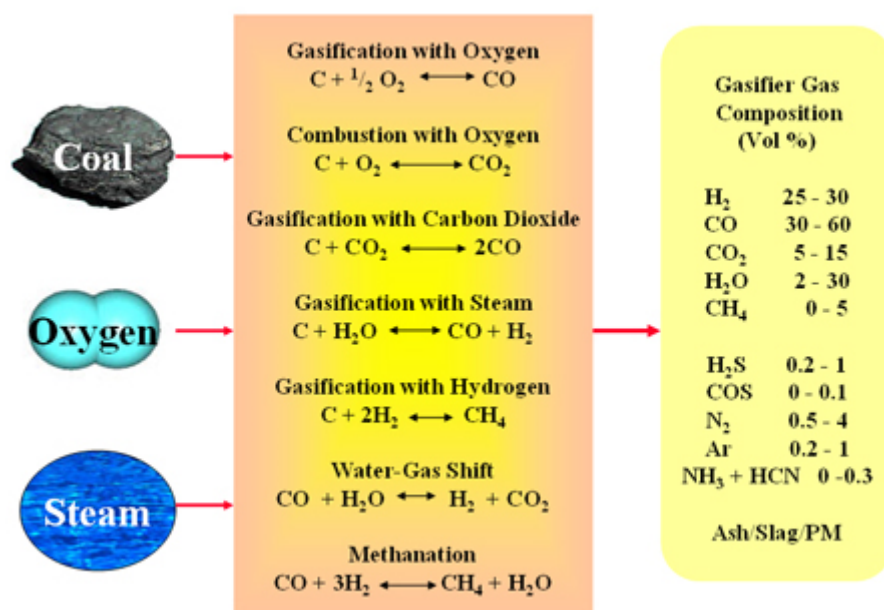
Αεριοποίηση είναι η θερμοχημική διαδικασία που μετατρέπει ανθρακούχα υλικά, όπως γαιάνθρακα, πετρέλαιο, βιοκαύσιμα ή βιομάζα, σε μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο (κατά κύριο λόγο), πραγματοποιώντας χημική αντίδραση ορυκτών υλών σε υψηλές θερμοκρασίες με ελεγχόμενη ποσότητα οξυγόνου ή/και ατμού. Το αέριο μίγμα που προκύπτει λέγεται «συνθετικό αέριο» και αποτελεί και το ίδιο καύσιμο αέριο. Η αεριοποίηση είναι μια μέθοδος για παραγωγή ενέργειας από διάφορων ειδών οργανικά υλικά.

Το πλεονέκτημα της αεριοποίησης είναι ότι η χρήση του συνθετικού αερίου είναι ενδεχομένως πιο αποδοτική απ' ότι απευθείας καύση του καυσίμου, γιατί αυτό μπορεί να καεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες αλλά ακόμα και σε κυψέλες καυσίμου, έτσι ώστε το ανώτερο θερμοδυναμικό όριο για την απόδοση, όπως ορίζεται στο νόμο του Carnot, να' ναι μεγαλύτερο ή μη εφαρμόσιμο. Το συνθετικό αέριο μπορεί να καεί απευθείας σε Μηχανές Εσωτερικής Καύσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή μεθανόλης και υδρογόνου ή να μετατραπεί μέσω της μεθόδου Fischer – Topsch σε συνθετικό καύσιμο. Η αεριοποίηση μπορεί επίσης να γίνει με υλικά που δεν είναι εκ των προτέρων χρήσιμα ως καύσιμα, όπως βιομάζα ή οργανικά κατάλοιπα. Επιπλέον, η καύση σε υψηλή θερμοκρασία διυλίζει διαβρωτικά στοιχεία, όπως χλώριο και κάλιο, επιτρέποντας την παραγωγή καθαρού αερίου από «προβληματικά» καύσιμα υλικά.

Η αεριοποίηση ορυκτών καυσίμων πλέον είναι ευρέως διαδεδομένη και χρησιμοποιείται σε διάφορα στάδια της ηλεκτροπαραγωγής. Ωστόσο, σχεδόν κάθε τύπος οργανικής ύλης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τροφοδοσία για αεριοποίηση, όπως ξύλο, βιομάζα ακόμα και πλαστικά απορρίμματα.

Η αεριοποίηση βασίζεται σε χημικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε ανώτερες θερμοκρασίες >700° C, οι οποίες τη διαφοροποιούν από άλλες βιοχημικές διεργασίες όπως η αναερόβια χώνευση που παράγει βιοαέριο.

Στην ουσία, η περιορισμένη ποσότητα οξυγόνου ή αέρια εισέρχεται στον αντιδραστήρα ώστε να επιτρέψει την «καύση» μέρους της οργανικής ύλης ώστε να παραχθεί μονοξείδιο του άνθρακα και ενέργεια, η οποία με τη σειρά της αντιδρά για την περαιτέρω μετατροπή της οργανικής ύλης σε υδρογόνο και πρόσθετο διοξείδιο του άνθρακα. Επιπλέον αντιδράσεις εμφανίζονται όταν το σχηματισμένο μονοξείδιο του άνθρακα καθώς και υπολείμματα νερού αντιδρούν με το μεθάνιο και περίσσειας διοξειδίου του άνθρακα. Αυτή η τελευταία αντίδραση απαντάται συχνά σε αντιδραστήρες με αυξημένο χρόνο παραμονής των αερίων και της οργανικής ύλης, όπως επίσης και αυξημένα επίπεδα πίεσης και θερμοκρασίας μέσα τους. Τέλος, χρησιμοποιούνται και καταλύτες σε πιο σύνθετους αντιδραστήρες για βελτίωση του βαθμού αντίδρασης εντός του αντιδραστήρα και ως εκ τούτου το σύστημα να προσεγγίζει το ισοζύγιο της αντίδρασης για έναν τυπικό χρόνο παραμονής.



Εικόνα 4.1. Διαδικασία σχηματισμού συνθετικού αερίου [20]

Τα προϊόντα της αεριοποίησης είναι ένα αέριο καύσιμο, που λέγεται συνθετικό αέριο και ένα αδρανές υλικό, γνωστό ως slag. Επιπλέον, αυτό ακολούθως παρουσιάζει αρκετά χαμηλότερα περιβαλλοντικά επίπεδα για τις αέριες εκπομπές αλλά και για τη διαρροή τοξικότητας από το slag, σε σύγκριση με την καύση.

4.1.2 Περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα [8]

Τα περιβαλλοντικά οφέλη προέρχονται από τη δυνατότητα εκκαθάρισης όσο δυνατόν περισσότερο μέχρι το 99% των ρυπογόνων ακαθαρσιών από αέρια παράγωγα του γαιάνθρακα. Τα θείο, στον γαιάνθρακα, για παράδειγμα, ενυπάρχει ως υδρόθειο και μπορεί να απομονωθεί με διεργασίες που έχουν μέχρι σήμερα αναπτυχθεί στη χημική βιομηχανία. Σε κάποιες μεθόδους, το θείο μπορεί να εξαχθεί σε μορφή η οποία είναι εμπορικά εκμεταλλεύσιμη. Παρομοίως, το άζωτο τυπικά υπάρχει ως αμμωνία και μπορεί να αποδεσμευτεί από το συνθετικό αέριο με διεργασίες που παράγουν λιπάσματα ή από άλλες χημικές βασιζόμενες στην αμμωνία.

Επίσης, άλλες προηγμένες διαδικασίες καθαρισμού και προσαρμογής αναπτύσσονται σήμερα και οι οποίες είναι ακόμα πιο αποδοτικές στην εξουδετέρωση εκπομπών από τους αεριοποιητές γαιάνθρακα. Διαδικασίες ελέγχου ρύπων αναπτύσσονται ώστε να ελέγχουν τους ρύπους και να τους μειώνουν σε συγκέντρωση της τάξεως του ppb (parts per billion) και είναι αποδοτικοί στον καθαρισμό του υδραργύρου και άλλων ιχνών μετάλλων, επιπλέον των ακαθαρσιών.

Η αεριοποίηση γαιάνθρακα μπορεί να προσφέρει ένα περαιτέρω περιβαλλοντικό πλεονέκτημα στην εξομάλυνση των ανησυχιών σχετικά με τη σταδιακή αύξηση εκπομπών αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, όπως το διοξείδιο του άνθρακα. Αν αντί του αέρα σε έναν αεριοποιητή έχουμε χρήση καθαρού οξυγόνου, όπως έγινε σ' αυτή τη μελέτη, το διοξείδιο του άνθρακα εκπέμπεται ως ξεχωριστό συγκεντρωμένο αέριο ρεύμα. Σ' αυτή τη μορφή μπορεί να συλλεχθεί πιο εύκολα και με μικρότερο

κόστος για μέγιστη διάθεση σε ποικίλες «απομαστεύσεις». (Αντιθέτως, όταν ο γαιάνθρακας καίγεται ή αντιδρά με τον αέρα, το 80% του οποίου είναι άζωτο, το παραγόμενο διοξείδιο του άνθρακα είναι πιο αραιό και πιο οικονομικά δυσχερές στο διαχωρισμό του από το παραγόμενο αέριο (καυσαέριο ή συνθετικό αέριο).

4.1.3 Οφέλη στην απόδοση [8]

Τα οφέλη στην απόδοση είναι άλλο ένα πλεονέκτημα της αεριοποίησης γαιάνθρακα. Σε μια τυπική μονάδα καύσης γαιάνθρακα, η θερμότητα από τον καιγόμενο γαιάνθρακα χρησιμοποιείται για βρασμό του νερού, ατμοπαραγωγή και κατ' επέκταση ηλεκτροπαραγωγή από έναν ατμοστρόβιλο. Ουσιαστικά μόνο το 1/3 της ενεργειακής αξίας του γαιάνθρακα μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια ενώ το υπόλοιπο χάνεται ως θερμότητα στο περιβάλλον.

Από την άλλη, ένα εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής με αεριοποίηση γαιάνθρακα, έχει διπλή χρήση από το αέριο που παράγεται. Πρώτη είναι η χρήση του, αφού έχει υποστεί καθαρισμό, ως καύσιμο σε αεριοστρόβιλο – παραπλήσιο με το φυσικό αέριο – για ηλεκτροπαραγωγή (SNG). Το ζεστό καυσαέριο του αεριοστρόβιλου διέρχεται μέσα από έναν ΛΑΘ και έτσι έχουμε ατμοπαραγωγή από έναν ατμοστρόβιλο. Αυτή η διπλή χρήση του αερίου για ηλεκτροπαραγωγή ονομάζεται «συνδυασμένος κύκλος» και μετατρέπει πολύ περισσότερη από την εσωτερική ενέργεια του γαιάνθρακα σε χρησιμοποιήσιμη ενέργεια. Η απόδοση του καυσίμου ενός εργοστασίου ηλεκτροπαραγωγής με αεριοποίηση γαιάνθρακα μπορεί να εκτιναχθεί σε ποσοστά ακόμα και άνω του 50% .

Μελλοντικές σκέψεις, οι οποίες ενσωματώνουν μία κυψέλη καυσίμου ή ένα υβριδικό σύστημα κυψέλης καυσίμου – αεριοστρόβιλου, κάνουν λόγο για ακόμα μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης, ίσως σε ποσοστό του 60% , ή τουλάχιστον κοντά στο διπλάσιο της σημερινής ηλεκτροπαραγωγής με καύση. Και αν κάποιο μέρος από την αναπομείνουσα απορριπτόμενη θερμότητα μπορεί να οδηγηθεί στο κύκλωμα ατμού ή θέρμανσης, πιθανόν για γειτονικά

εργοστάσια ή περιφερειακά θερμικά εργοστάσια, ο συνολικός βαθμός απόδοσης μπορεί να εκτοξευθεί στο 70 και 80 %.

Υψηλότεροι βαθμοί απόδοσης μεταφράζονται ως πιο οικονομική ηλεκτροπαραγωγή και μεγαλύτερη ευχέρεια για τους φορολογούμενους καταναλωτές. Ένα πιο αποδοτικό εργοστάσιο χρησιμοποιεί λιγότερη ποσότητα καυσίμου για παραγωγή ενέργειας, που σημαίνει λιγότερους ρύπους. Εμπράκτως, υπάρχουν εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής με αεριοποίηση γαιάνθρακα, στα οποία έχει αναπτυχθεί σύστημα που αποτρέπει το σχηματισμό διοξειδίου του άνθρακα σε ποσοστό 40% ή και περισσότερο, συγκρινόμενα με τα σημερινά συμβατικά εργοστάσια με καύση γαιάνθρακα.

Η ικανότητα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, υδρογόνου, χημικών και ποικίλων συνδυασμών, με την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των αέριων ρυπαντών και αυτών που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθιστά την αεριοποίηση του γαιάνθρακα μία από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες για τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής του μέλλοντος.

4.1.4. Λειτουργία αεριοποιητή [9]

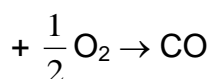
Η καρδιά του συστήματος αεριοποίησης είναι ο αεριοποιητής. Ο αεριοποιητής μετατρέπει τους υδρογονάνθρακες από τον λιγνίτη σε αέρια στοιχεία με εφαρμογή θερμότητας υπό πίεση και με την παρουσία οξυγόνου (ή ατμού).

Στον αεριοποιητή, το ανθρακούχο υλικό υποβάλλεται σε διάφορα στάδια διεργασιών όπως α) πυρόλυση β) καύση γ) αεριοποίηση δ) αντίδραση μετατόπισης νερού – αερίου.

A) Η πυρόλυση εμφανίζεται όταν το ανθρακούχο κλάσμα θερμαίνεται. Απελευθερώνονται πτητικές ουσίες και παράγεται εξαναθράκωμα, με αποτέλεσμα την κατά 70% μείωση της μάζας του γαιάνθρακα. Η διαδικασία αυτή είναι εξαρτημένη από τις ιδιότητες των ανθρακούχων υλικών και

καθορίζει τη δομή και τη σύνθεση του εξανθρακώματος, το οποίο στη συνέχεια «περνά» μέσα από τις αντιδράσεις της αεριοποίησης.

Β) Η διαδικασία της καύσης λαμβάνει χώρα μόλις τα πτητικά προϊόντα και μια ποσότητα εξανθρακώματος αντιδρά με το οξυγόνο για να σχηματιστεί διοξείδιο και μονοξείδιο του άνθρακα, τα οποία παρέχουν τη θερμότητα για τις επακόλουθες χημικές αντιδράσεις. Η κύρια χημική αντίδραση εδώ είναι :



Γ) Η διαδικασία της αεριοποίησης λαμβάνει χώρα όταν το εξανθράκωμα αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα και τον ατμό για να παράξει μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο, σύμφωνα με την αντίδραση: $C + H_2O \rightarrow H_2 + CO$.

Δ) Τέλος, λαμβάνει χώρα η αντίδραση μετατόπισης νερού – αερίου : $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$. Αυτή φτάνει σε ισορροπία πάρα πολύ γρήγορα στις θερμοκρασίες του αεριοποιητή. Αυτή ισορροπεί τις συγκεντρώσεις του μονοξειδίου του άνθρακα – νερού και διοξειδίου του άνθρακα – υδρογόνου.

Ο αεριοποιητής διαφέρει από τον καυστήρα στο γεγονός ότι η ποσότητα οξυγόνου μέσα στον αεριοποιητή ελέγχεται προσεκτικά ώστε μόνο σχετικά μικρές ποσότητες καυσίμου καίγονται ολωσδιόλου. Αυτή η «μερική οξειδωση» παρέχει τη θερμότητα. Σε σύγκριση με την καύση, στην αεριοποίηση το μεγαλύτερο μέρος των υδρογονανθράκων διαλύεται χημικά από την πίεση και τη θερμοκρασία που επικρατούν στον αεριοποιητή, θέτοντας σε κίνηση χημικές αντιδράσεις που παράγουν το «συνθετικό αέριο». Το συνθετικό αέριο είναι αρχικά υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα, αλλά μπορεί να περιέχει και άλλες αέριες συνιστώσες. Η σύνθεσή του μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τις συνθήκες στον αεριοποιητή και τον τύπο του εισαγόμενου καυσίμου καθώς και το μέσο αεριοποίησης (εδώ πχ καθαρό οξυγόνο, ατμός κλπ).

Μεταλλικά στοιχεία στο καύσιμο, τα οποία δεν αεριοποιούνται όπως ανθρακούχες συνιστώσες αφήνουν τον αεριοποιητή είτε ως αδρανή σκουριά (υαλώδης) ή σε μορφή χρήσιμη για στερεά προϊόντα της αγοράς. Ένα μικρό

κλάσμα της μεταλλικής αυτής ύλης εξέρχεται από τον αεριοποιητή ως ιπτάμενη τέφρα και απαιτείται κατασκευή αγωγού εξόδου.

Θεικές ακαθαρσίες στο καύσιμο μετατρέπονται σε υδρόθειο θειούχο καρβονύλιο, από τα οποία μπορεί να απομακρυνθεί εύκολα το θείο, τυπικά ως στοιχειώδες θείο ή ως θειικό οξύ και τα δύο ως παραπροϊόντα. Οξειδία του αζώτου, άλλος ένας πιθανός ρυπαντής, δεν σχηματίζονται κατά την αεριοποίηση με καθαρό οξυγόνο. Αντ' αυτού, σχηματίζεται αμμωνία από αντιδράσεις υδρογόνου και αζώτου. Η αμμωνία μπορεί εύκολα να εξαχθεί από τον αεριοποιητή.

Σε μονάδα συνδυασμένου κύκλου με ολοκληρωμένη αεριοποίηση (Integrated Gasification Combined-Cycle- IGCC), το «συνθετικό αέριο» καθαρίζεται από τα στοιχεία υδρόθειου που περιέχει, η αμμωνία και κάποια σωματίδια καίγονται σαν καύσιμο στο θάλαμο καύσης ενός αεριοστροβίλου (παραπλήσια με την καύση φυσικού αερίου σε αεριοστρόβιλο) και έτσι έχουμε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα καυσαέρια διέρχονται μέσα από έναν Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας και έτσι έχουμε ατμοπαραγωγή για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ατμοστρόβιλο

Η χρήση αυτών των δύο στροβιλομηχανών (ενός αεριοστροβίλου και ενός ατμοστροβίλου) σε συνδυασμό, γνωστή ως «συνδυασμένος κύκλος», είναι ένας λόγος γιατί τα συστήματα ενέργειας που βασίζονται στην αεριοποίηση μπορούν να επιτύχουν υψηλή απόδοση ηλεκτροπαραγωγής. Επί του παρόντος, εμπορικά διαθέσιμα συστήματα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής που βασίζονται στην αεριοποίηση, μπορούν να λειτουργήσουν με βαθμούς απόδοσης της τάξης του 40%. Στο μέλλον, κάποια τέτοια IGCC συστήματα θα'ναι δυνατά να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με απόδοση που μπορεί να φτάνει το 60% με την ανάπτυξη των εξελιγμένων υψηλής πίεσης κυψέλων καυσίμου διοξειδίου του άνθρακα.

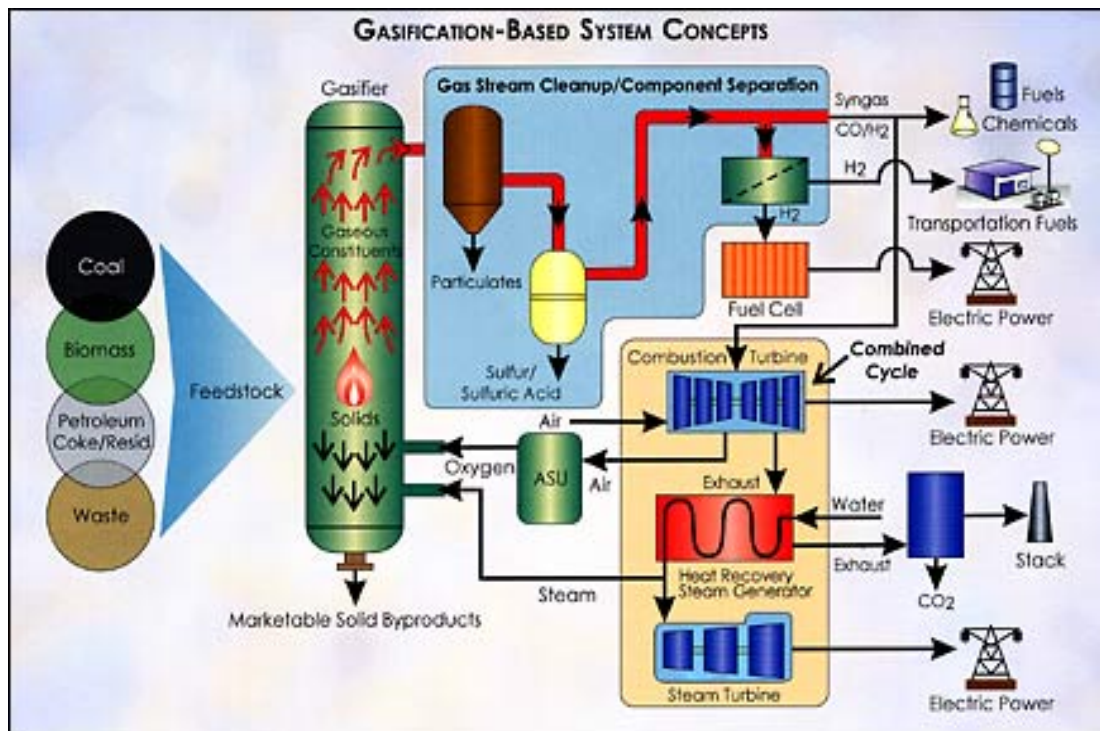
Υψηλότεροι βαθμοί απόδοσης σημαίνουν μικρότερη κατανάλωση καυσίμου για δεδομένη ηλεκτροπαραγωγή. Ως αποτέλεσμα καλύτερα οικονομικές επιπτώσεις και οικολογικές επιπτώσεις λόγω των μειωμένων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής με 60%

β.α. μπορεί να περιορίσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στο 40% συγκρινόμενη με τυπική λιγνιτική μονάδα β.α. 33-40%).

Ολόκληρη η ποσότητα ή έστω ένα μέρος του παραγόμενου συνθετικού αερίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με άλλους τρόπους :

- ως χημικό «κατασκευαστικό μπλοκ» για παραγωγή περισσότερων καυσίμων και χημικών υψηλής θερμογόνου δύναμης είτε σε υγρή είτε σε αέρια μορφή.
- Ως παραγωγός υψηλής απόδοσης κυψέλων καυσίμου ή ,ίσως μελλοντικά, υβριδικών συστημάτων κυψέλης καυσίμου και στροβιλομηχανών
- Ως πηγή υδρογόνου που μπορεί να διαχωριστεί από το ρεύμα συνθετικού αερίου και να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο (για παράδειγμα σε αυτοκίνητο με καύσιμο υδρογόνο) ή ως πρώτη ύλη για τα διυλιστήρια (τα οποία χρησιμοποιούν το υδρογόνο για αναβάθμιση των πετροχημικών τους προϊόντων).

Άλλο ένα πλεονέκτημα των συστημάτων που βασίζονται στην αεριοποίηση είναι πως όταν χρησιμοποιείται οξυγόνο (παρά αέρας) στον αεριοποιητή, το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται είναι συγκεντρωμένο σε ένα ρεύμα αερίου και έτσι καθίσταται οικονομικότερος και ευκολότερος ο διαχωρισμός και δέσμευσή του. Μόλις το διοξείδιο του άνθρακα δεσμευτεί, μπορεί να απομονωθεί και έτσι αυτό συμβάλλει ευμενώς στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.



Εικόνα 4.2. Παραγωγικές μονάδες βασιζόμενες στην αεριοποίηση. [9]

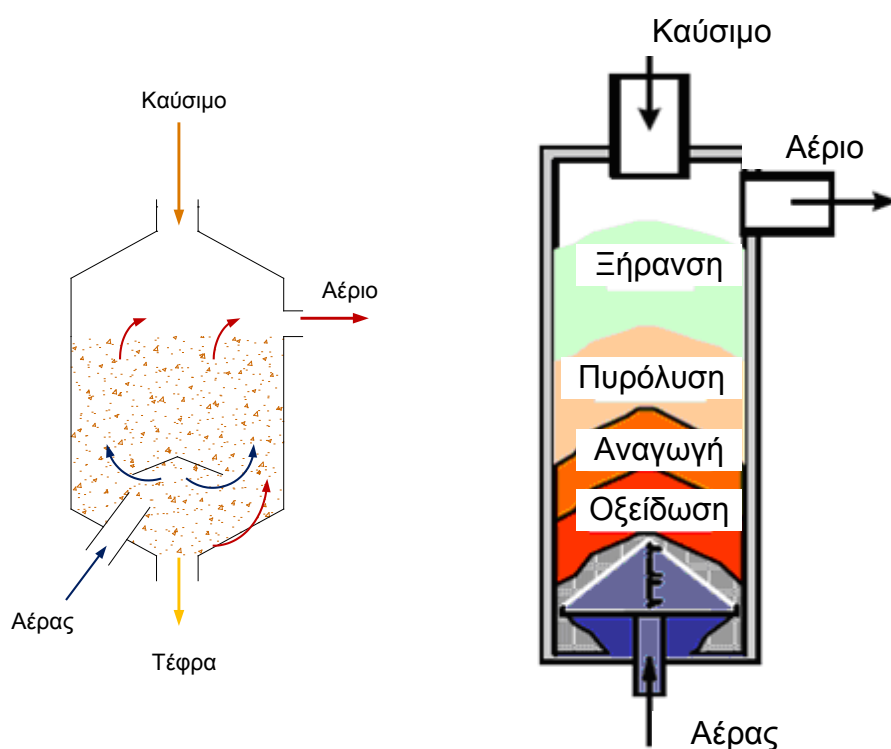
4.1.5 Τεχνολογικοί τύποι αεριοποίησης

Σήμερα, τέσσερις τύποι αεριοποιητών είναι διαθέσιμοι για εμπορική χρήση: α) σταθερής κλίνης κατ' ανιρροή (ανερχόμενης ροής) β) σταθερής κλίνης με ομοροή (κατερχόμενης ροής), γ) ρευστοποιημένης κλίνης δ) ενσωματωμένης ροής

A) [10] Στον αεριοποιητή σταθερής κλίνης κατ' ανιρροή το στερεό καύσιμο εισέρχεται από την κορυφή και το οξειδωτικό από το κατώτατο σημείο του αντιδραστήρα μέσω μιας εσχάρας. Το στερεό καύσιμο που κινείται προς τα κάτω πρώτα ξηραίνεται από το θερμό παραγόμενο αέριο που κινείται προς τα πάνω. Μετά την ξήρανση το στερεό καύσιμο πυρολύεται, δίνοντας στερεό υπόλειμμα που συνεχίζει να κινείται καθοδικά και αέρια πυρόλυσης που παρασύρονται από το ανοδικό ρεύμα του παραγόμενου αερίου και κινούνται προς τα πάνω. Οι παραγόμενες πίσσεις είτε συμπυκνώνονται είτε παρασύρονται από το παραγόμενο αέριο και οδηγούνται έξω από τον

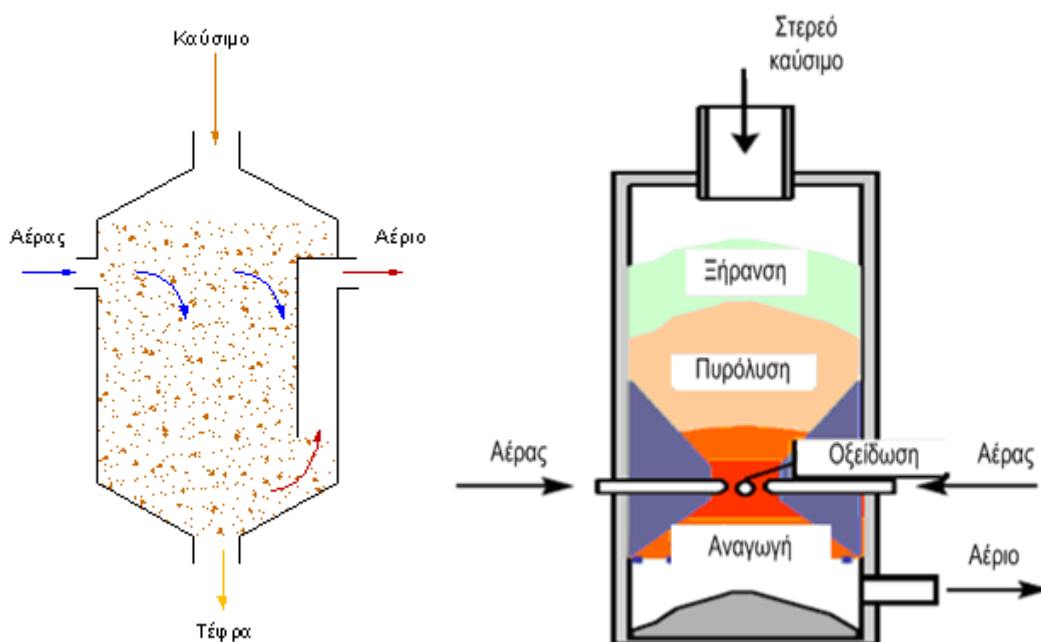
αντιδραστήρα. Οι πίσσες που έχουν συμπυκνωθεί οδηγούνται πάλι στις ζώνες αντίδρασης, όπου προκαλείται περαιτέρω διάσπαση σε υπόλειμμα και αέριο. Στην ζώνη αεριοποίησης το στερεό υπόλειμμα από τις πίσσες και την πυρόλυση οξειδώνεται από το εισερχόμενο οξυγόνο ή τον εισερχόμενο αέρα. Μπορεί επίσης να προστεθεί ατμός για να παραχθεί αέριο με υψηλότερο ποσοστό υδρογόνου.

Το παραγόμενο αέριο από έναν αεριοποιητή ανερχόμενης ροής περιέχει σημαντικό ποσοστό πισσών και υδρογονανθράκων, οι οποίοι συνεισφέρουν στην υψηλή θερμογόνο ικανότητά του. Χρειάζεται φυσικά καλό καθαρισμό αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε περαιτέρω διεργασίες. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του τύπου των αεριοποιητών είναι η απλή κατασκευή τους και η υψηλή θερμική απόδοσή τους. Όμως υπάρχει περιορισμένη δυνατότητα κατασκευής αντιδραστήρων μεγάλου μεγέθους αυτού του τύπου.



Εικόνα 4.3. Σχηματική απεικόνιση του αντιδραστήρα κατ' αντιστροφή [11],[12]

B) Ο αεριοποιητής σταθερής κλίνης σε ομορροή είναι παρόμοιος με αυτόν κατ' αντιρροή, αλλά το μέσο της αεριοποίησης ρέει αντίθετα με τη ροή του καυσίμου (μάλιστα το μέσο έχει καθοδική πορεία). Απαιτείται να προστεθεί θερμότητα στο πάνω τμήμα της κλίνης , είτε με καύση μικρών ποσοτήτων του καυσίμου, είτε από εξωτερικές πηγές θερμότητας. Το παραγόμενο αέριο εξέρχεται από τον αεριοποιητή σε πολύ υψηλή θερμοκρασία και το μεγαλύτερο μέρος αυτής της θερμότητας συχνά μεταδίδεται στο μέσο της αεριοποίησης στην κορυφή της κλίνης, με αποτέλεσμα θερμική απόδοση στα ίδια επίπεδα με την αεριοποίηση σε κλίνη κατ' αντιρροή. Από τη στιγμή που όλη η πίσσα πρέπει να διέλθει μέσα από την ζεστή κλίνη εξανθρακώματος, τα επίπεδά της πίσσας είναι πολύ μικρότερα απ' ό,τι στους κατ' αντιρροή αεριοποιητές.

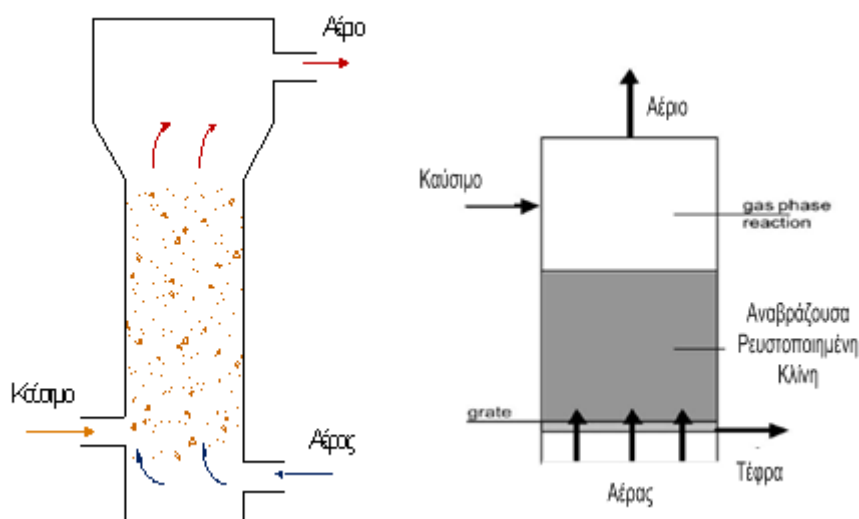


Εικόνα 4.4. Σχηματική απεικόνιση του αντιδραστήρα ομορροής.

[11],[12]

Γ) Στον αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης, το καύσιμο ρευστοποιείται με οξυγόνο και ατμό ή αέρα. Η τέφρα απομακρύνεται ξηρή ή ως βαρύ συσσωμάτωμα που δεν ρευστοποιείται. Οι θερμοκρασίες είναι σχετικά χαμηλές σε αεριοποιητές ξηρής τέφρας, έτσι ώστε το καύσιμο ν' αντιδρά εύκολα και έτσι γαιάνθρακες χαμηλής ποιότητας είναι οι πλέον κατάλληλοι. Οι αεριοποιητές με συσσωματώματα έχουν κατ' ελάχιστο πιο υψηλές

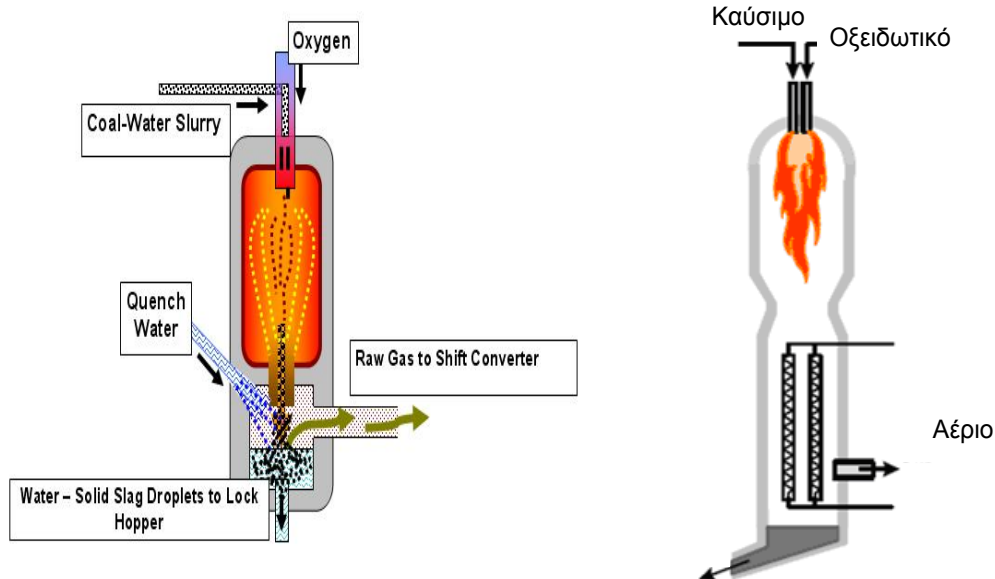
θερμοκρασίες και είναι κατάλληλες για υψηλότερης ποιότητας γαιάνθρακες. Η απόδοση του καυσίμου είναι υψηλότερη απ' ό,τι στους αεριοποιητές σταθερής κλίνης και όχι τόσο μεγάλη με του αεριοποιητές ενσωματωμένης ροής. Ο βαθμός μετατροπής μπορεί να είναι αρκετά χαμηλός εξαιτίας της «ταξινόμησης» των ανθρακικών στοιχείων. Η ανακύκλωση ή η επακόλουθη καύση των στερεών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αύξηση της μετατροπής. Οι αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης είναι περισσότερο κατάλληλοι για καύσιμα που σχηματίζουν τέφρα άκρως διαβρωτική, η οποία θα μπορούσε να φθείρει τα τοιχώματα του αεριοποιητή. Η βιομάζα μάλιστα περιέχει διαβρωτική τέφρα σε μεγάλη κλίμακα.



Εικόνα 4.5. Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης

Δ) Στον αεριοποιητή ενσωματωμένης ροής, το ξηρό κονιοροποιημένο στερεό, το ψεκάσιμο υγρό καύσιμο ή καύσιμο διάλυμα αεριοποιείται με οξυγόνο (σπανιότερα με αέρα) σε σύστημα ομορροής. Οι αντιδράσεις αεριοποίησης λαμβάνουν χώρα σε ένα πυκνό νέφος από πολύ μικρά σωματίδια. Οι περισσότεροι γαιάνθρακες είναι κατάλληλοι γι' αυτόν τον τύπο του αεριοποιητή, λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας και επειδή τα σωματίδια του γαιάνθρακα είναι πολύ καλά διαχωρισμένα μεταξύ τους. Οι υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις επίσης σημαίνουν ότι μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερη απόδοση, παρόλο που η θερμική απόδοση είναι χαμηλότερη αφού το αέριο πρέπει να ψυχθεί προτού καθαριστεί με την

υπάρχουσα τεχνολογία. Οι υψηλές θερμοκρασίες επίσης καθιστούν το παραγόμενο αέριο χωρίς ποσότητες πίσσας και μεθανίου. Όμως, η απαίτηση για οξυγόνο είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τους υπόλοιπους τύπους αεριοποιητών. Όλοι οι αεριοποιητές ενσωματωμένης ροής απομακρύνουν το μεγαλύτερο ποσοστό τέφρας ως σκουριά, αφού η θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι πολύ χαμηλότερες από τη θερμοκρασία σχηματισμού τέφρας. Ένα μικρότερο μέρος της τέφρας παράγεται ως πολύ λεπτή, ξηρή, ιπτάμενη τέφρα ή ως μαύρη υδαρή ιπτάμενη τέφρα. Κάποια καύσιμα, συγκεκριμένα τύποι βιομάζας, μπορούν να σχηματίσουν σκουριά, η οποία είναι διαβρωτική για κεραμικά εσωτερικά τοιχώματα, τα οποία εξυπηρετούν στην προστασία των εξωτερικών τοιχωμάτων του αεριοποιητή. Παρόλα αυτά, κάποιοι αεριοποιητές ενσωματωμένης ροής δεν διαθέτουν εσωτερικό κεραμικό τοίχωμα, αλλά έχουν νερό ή ψυχόμενο από ατμό τοίχωμα που καλύπτεται από μερικώς στερεοποιημένη σκουριά. Αυτοί οι αεριοποιητές δεν καταπονούνται από διαβρωτική σκουριά. Κάποια καύσιμα περιέχουν στάχτη με μεγάλη θερμοκρασία σύντηξης της. Σε αυτή την περίπτωση αναμειγνύεται ασβεστόλιθος με το καύσιμο, πριν από την αεριοποίηση. Προσθήκη λιγοστής ποσότητας ασβεστόλιθου συνήθως επαρκεί για μείωση της θερμοκρασίας σύντηξης. Τα σωματίδια των καυσίμων πρέπει να' ναι πολύ μικρότερα απ' ότι άλλων αεριοποιητών. Αυτό σημαίνει ότι το καύσιμο πρέπει να κονιορτοποιηθεί, διεργασία που απαιτεί προσθήκη ενέργειας, μειονέκτημα έναντι των άλλων τύπων αεριοποιητών. Ασυζητητή η μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας στον αεριοποιητή ενσωματωμένης ροής, δεν είναι η ενέργεια για ανάμιξη του καυσίμου, αλλά η ενέργεια για την παραγωγή του οξυγόνου που απαιτείται για την αεριοποίηση.

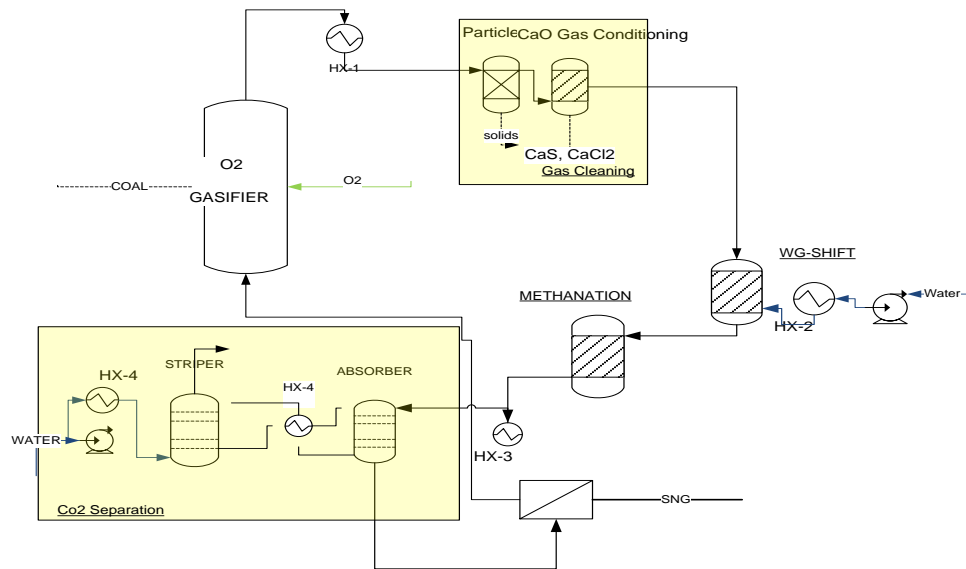


Εικόνα 4.6. Σχηματική απεικόνιση αεριοποιητή ενσωματωμένης ροής [12] , [13]

4.1.6 Αεριοποίηση γαιάνθρακα με οξυγόνο [14]

Οι περισσότερες από τις ανεπτυγμένες τεχνολογίες μέχρι στιγμής αποτελούνται από αυτόθερμους αεριοποιητές, για παράδειγμα με τη συμβολή ενός υποστοιχειομετρικού οξειδωτικού το οποίο βασίζεται κυρίως στο οξυγόνο και λειτουργεί σε ένα εύρος πίεσης από 5 έως και 70 bar και σε υψηλές θερμοκρασίες γύρω στους 1400°C. Οι υψηλές αυτές θερμοκρασίες λειτουργίας είναι πολύ σημαντικές λόγω της χαμηλής αντιδραστικότητας των ακαύστων του λιθάνθρακα. Αυτό όμως μπορεί να μην ισχύει σε κάποια είδη λιγνίτη και γι'αυτό εφαρμόζεται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Έως τώρα όμως, για την αεριοποίηση του λιθάνθρακα προτιμώμενοι είναι οι αεριοποιητές ενσωματωμένης ροής και επιλέγονται στην πλειοψηφία των εμπορικών μονάδων συνδυασμένου κύκλου με αεριοποίηση (IGCC). Οι δύο πιο γνωστοί τύποι αεριοποιητών ενσωματωμένης ροής είναι αυτοί με α) την καύση στην κορυφή υδαρούς τροφοδοσίας γαιάνθρακα/νερού και β) πλευρική καύση ξηρού γαιάνθρακα (shell). Εδώ μοτελοποιήθηκε ένας αεριοποιητής ξηρού γαιάνθρακα με λόγο οξυγόνου 0,4. Το οξυγόνο παράγεται στη μονάδα διαχωρισμού του αέρα (ASU) και τροφοδοτεί τον αεριοποιητή. Πρακτικά, οι

υψηλές θερμοκρασίες του οξυγόνου σχεδόν ελαχιστοποιούν το μεθάνιο που παράγεται στο στάδιο της πυρόλυσης (είναι το πρώτο στάδιο της αεριοποίησης, όπου σχηματίζονται οι υδρογονάνθρακες). Το γενικό σύστημα παρουσιάζεται στην εικόνα 4.7.



Εικόνα 4.7. Βασική διαμόρφωση συστήματος παραγωγής SNG με αεριοποιητή οξυγόνου. [14]

Στις εικόνες 4.8 και 4.9 παρουσιάζονται 2 μονάδες αεριοποίησης γαιάνθρακα.



*Εικόνα 4.8. Το Wabash River Coal Gasification Repowering Project στην
Ιντιάνα των ΗΠΑ*



Εικόνα 4.9. Tampa Electric Gasification Plant στην πολιτεία της Φλόριντα [20]

4.1.7. Καύση vs Αεριοποίηση [15]

- Η μέθοδος της αεριοποίησης είναι κατά κάποιον τρόπο λιγότερο γνωστή από την καύση. Η καύση είναι περισσότερο γνωστή εδώ και πολύ καιρό, τεχνολογικά και εμπορικά.
- Η μέθοδος της αεριοποίησης μετατρέπει το στερεό καύσιμο σε αέριο καύσιμο μέσα από αντιδράσεις οξειδωσης – αναγωγής σε υψηλές θερμοκρασίες. Η μέθοδος της καύσης μετατρέπει στερεό καύσιμο σε αέρια προϊόντα της καύσης μέσω αντιδράσεων οξειδωσης, υψηλής θερμοκρασίας
- Η αεριοποίηση συγκεντρώνει θερμότητα σε χημικούς δεσμούς μετατρέποντας την ενέργεια σ' αυτά τα αέρια καύσιμα. Η καύση απελευθερώνει την ενέργεια στα υψηλής θερμοκρασίας παραγόμενα προϊόντα.
- Το προϊόν της αεριοποίησης είναι καύσιμο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί περεταίρω για καύση, σε κυψέλες καυσίμου, παραγωγή μεθανόλης κ.α. Συγκρινόμενη με την απ' ευθείας καύση, καύση μετά από αεριοποίηση μπορεί να μεταφραστεί ως διαδικασία διπλού βήματος.
- Από τη θερμοχημική μετατροπή στερεού καυσίμου, το αέριο καύσιμο μπορεί να ψυχθεί μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και να είναι δυνατή η μεταφορά του σε οικονομικής σημασίας αποστάσεις 50 – 100 μέτρων για χρήση του σε μία ή περισσότερες περιοχές. Από την άλλη, όταν πραγματοποιείται η διαδικασία της καύσης, τα ζεστά αέρια αποτελούμενα από CO₂ και H₂O μαζί με κλάσματα ανεπιθύμητων εκπομπών, θα χρησιμοποιηθούν μόνο τοπικά και τα καυσαέρια διαχειρίζονται ώστε να διατηρούνται τα όρια εκπομπών.
- Η καύση αέριων καυσίμων μπορεί να διαχειριστεί για υψηλή περιβαλλοντική συμβατότητα με ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων εκπομπών. Για επίτευξη αυτού, υιοθετούνται μέθοδοι καύσης σε δύο στάδια.
- Είναι τυπικά κατανοητό ότι η ηλεκτροπαραγωγή μέσω καύσης είναι οικονομική για μεγάλες μονάδες, έκτασης 3 MWe. Το κόστος για κάθε εγκατεστημένο MWe είναι περίπου 1 εκατομμύριο USD. Στην

πραγματικότητα η απόδοση μιας τέτοιας μονάδας είναι γύρω στο 30%.
Ακόμα και μονάδες ηλεκτροπαραγωγής 200 MWe μπορούν να προσεγγίσουν βαθμούς απόδοσης 35 % (χρησιμοποιώντας γαιάνθρακα υψηλής θερμογόνου ικανότητας)

- Ο κύριος λόγος γι' αυτό το χαρακτηριστικό είναι ότι ενώ οι θερμοκρασίες φλόγας από καύση είναι περίπου 1400 – 1600 ° C, αυτή η θερμότητα μεταφέρεται σε ένα εργαζόμενο ρευστό, ήτοι ατμός, με θερμοκρασίες λειτουργίας 600 – 800 ° C και ως εκ τούτου οι αποδόσεις της θερμοδυναμικής μετατροπής περιορίζονται.
- Αν ένας, από την άλλη, κάνει χρήση των υψηλών θερμοκρασιών της καύσης άμεσα, όπως συμβαίνει στις μηχανές εσωτερικής καύσης ή συνεχής εσωτερική καύση, όπως στους αεριοστρόβιλους, τότε μπορεί να εξάγει μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης σε λειτουργίες ανοιχτού κύκλου. Για παράδειγμα, οι μηχανές εσωτερικής καύσης 1 MWe με καύση βιοαερίου (75% CH₄ και 25% CO₂) δίνουν βαθμούς μετατροπής 36 – 40 % σε σύστημα ανοιχτού κύκλου. Υπάρχει ακόμα θερμότητα στους 350 – 400 ° C που μπορεί να δεσμευτεί χρησιμοποιώντας αμοπααραγωγούς με απορριπτόμενη θερμότητα.
- Σε εγκατάσταση καύσης διπλού καυσίμου (χρησιμοποιώντας ελαφρύ πετρέλαιο και φυσικό αέριο ή βιομάζα) μεγέθους 1 MWe , οι ολικές αποδόσεις για τη μετατροπή που' χουν μετρηθεί για διανεμόμενα φορτία των 750 kWe, είναι περίπου στο 30% . Η απόδοση μπορεί να φτάσει κιόλας και το 35% όταν η εγκατάσταση λειτουργεί σε πλήρες φορτίο.
- Ως εκ τούτου, η χρήση μηχανών εσωτερικής καύσης μπορεί να επιτύχει της τάξης του 40% ακόμα και σε συστήματα ανοιχτού κύκλου για φορτία από 1 έως 3 MWe.
- Σε μεγάλα μεγέθη ηλεκτροπαραγωγής ~ 5 MWe, μπορεί να προσθέσει ένα τμήμα αμοπααραγωγής που μπορεί να προσθέσει επιπλέον 2 MWe, πράγμα που επιτυγχάνει βαθμούς απόδοσης 43 – 45 %, καθιστώντας τη μονάδα συνδυασμένου κύκλου με αεριοποίηση σε επίπεδα κόστους 1.5 έως 1.75 εκατομμυρίων δολαρίων ανά MWe.

- Το όφελος από την παραπάνω μονάδα είναι ότι μπορεί να επιτευχθεί πλέον χωρίς ρίσκο – μόνο υιοθετώντας υπομονάδες από ήδη υπάρχοντα συστήματα 1 MWe ή συνδυασμός κάποιων αεριοποιητών που παρέχουν αέριο σε μια μεμονωμένη μηχανή διπλού καυσίμου ή αεριοστρόβιλο 2.5 - 3.5 MWe.
- Κάνοντας αυτά, οι εκπομπές – (α) αέρια NO_x , CO και SO_x επιτυγχάνουν τις διεθνείς νόρμες , (β) οι υγρές εκροές μπορούν να διαχειριστούν με μεθόδους διαχείρισης με νερό που είναι διαδεδομένες και η εναπόθεση λάσπης είναι εντός των διεθνών ορίων (γ) στερεά υπολείμματα, όπως τέφρα και εξανθρακώματα που χρησιμοποιούνται για υγειονομική ταφή μετά από περεταίρω επεξεργασία που μπορεί να μην χρειάζονται στις περισσότερες περιπτώσεις.

Συνοψίζοντας, η κλασική τεχνολογία καύσης με συνδυασμό ατμοπαραγωγής είναι μια διαδικασία πολυβάθμια με μέτριας απόδοσης μετατροπή γαιάνθρακα σε ηλεκτροπαραγωγή και με είτε περιορισμένες ενδιάμεσες δυνατότητες με λογικό κόστος ή ακριβές ενδιάμεσες δυνατότητες για χαμηλές εκπομπές ρύπων. Η τεχνολογία της αεριοποίησης είναι μια διαδικασία «πολυβάθμιων» καύσεων» με υψηλή απόδοση μετατροπής (από γαιάνθρακα σε ηλεκτροπαραγωγή) και μέτρια κόστη από πολύ μικρά επίπεδα ηλεκτροπαραγωγής της τάξης των 10 kW μέχρι αρκετά MW στα οποία προκύπτει όφελος από εξάλειψη ανεπιθύμητων σε διάφορα στάδια μεταξύ του αρχικού και τελικού βήματος, χρησιμοποιώντας τις μέχρι του παρόντος διαθέσιμες τεχνολογίες για ποικίλες ενδιάμεσες διεργασίες.

4.2 Μοντελοποίηση Αεριοποιητή

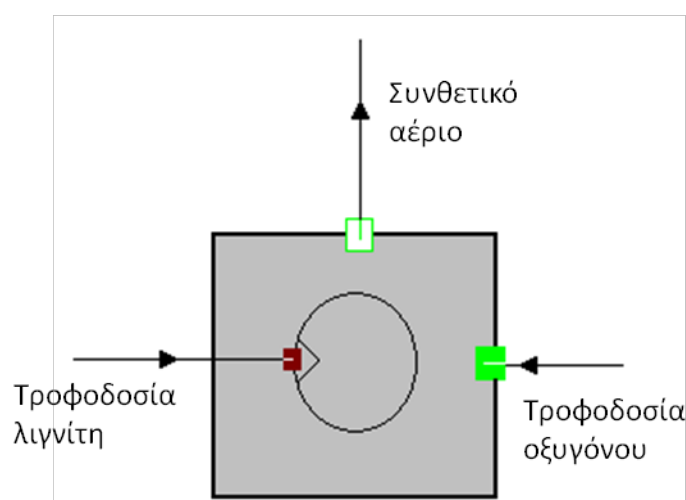
Οι ακόλουθες απλοποιημένες χημικές αντιδράσεις περιγράφουν τη βασική διαδικασία της αεριοποίησης:

- 1) $C(s) + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$ (ετερογενής αντίδραση μετατόπισης νερού – αερίου, ενδόθερμη)
- 2) $C(s) + CO_2 \leftrightarrow 2CO$ (ισοζύγιο Boudouard - ενδόθερμη)
- 3) $C(s) + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$ (αεριοποίηση υδρογόνωσης – εξώθερμη)
- 4) $CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$ (αποσύνθεση μεθανίου - ενδόθερμη)
- 5) $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$ (αντίδραση μετατόπισης νερού – αερίου , εξώθερμη)

Στον αεροποιητή οξυγόνου η αντίδραση Boudouard είναι μείζονος σημασίας. Το CO_2 από την ταχεία οξείδωση του άνθρακα ωθεί την αντίδραση στην παραγωγή CO . Το ολικό αντιδρόν μίγμα είναι εξώθερμο. Οι αντιδράσεις στις οποίες συμμετέχουν τα άτομα του υδρογόνου μειώνονται στο μέτρο που το υδρογόνο γίνεται εμφανές στο μίγμα. Είναι σύνηθες, επίσης, η εισαγωγή στον αντιδραστήρα ποσότητας ατμού μαζί με το μέσο αεριοποίησης (οξυγόνο) ώστε να επιτευχθούν παρόμοια αποτελέσματα όπως στην αλλοθερμική αεριοποίηση.

Η μοντελοποίηση του αεροποιητή στο MDK του IPSEpro™ και οι εντολές που διέπουν τη λειτουργία του παρατίθενται στο Παράρτημα 2. [22]

Το μοντέλο του αεροποιητή στο IPSE Pro φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

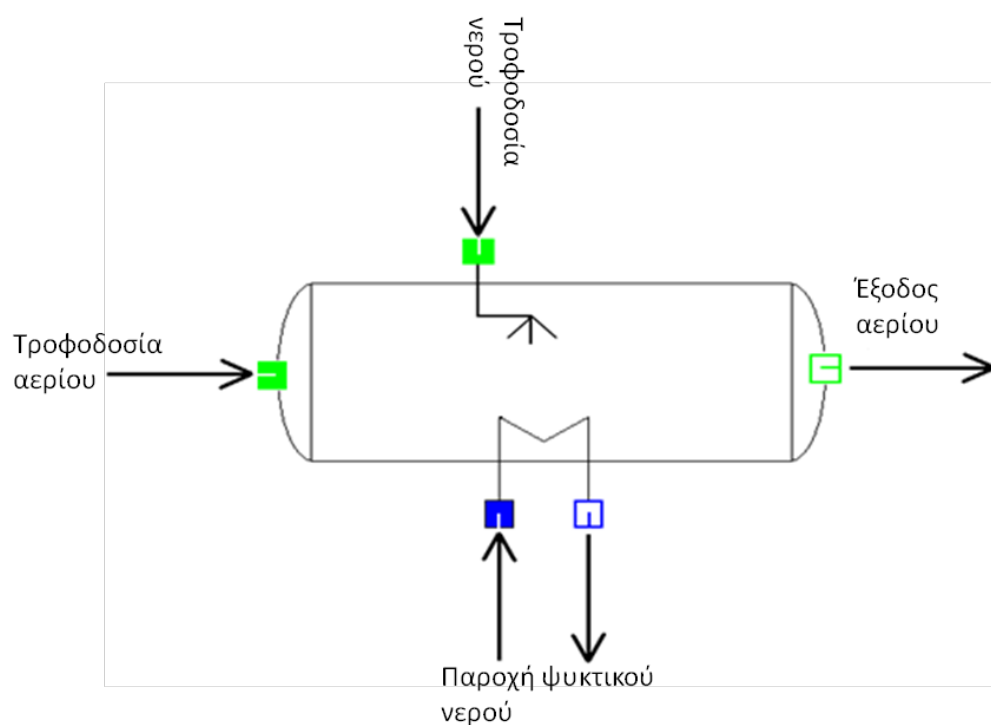


Εικόνα 4.9. Σχηματική απεικόνιση μοντέλου αεροποιητή οξυγόνου σύμφωνα με το IPSEpro™

Κεφάλαιο 5. Αντιδραστήρας μετα- τόπισης νερού – αερίου [22]

5.1. Γενικά

Το συνθετικό αέριο εξέρχεται από τον αεριοποιητή και εισέρχεται στον αντιδραστήρα μετατόπισης νερού - αερίου αφού πρώτα περάσει από έναν εναλλάκτη θερμότητας, ώστε η θερμοκρασία του να πέσει από τους 800°C στους 400°C. Κατά την αντίδραση Shift ισχύει η παρακάτω εξίσωση: $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$, μόρια του H_2O και του CO αντιδρούν και σχηματίζουν CO_2 και H_2 . Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται ο λόγος H_2/CO στο αέριο. Η αντίδραση είναι εξώθερμη ($\Delta H_R = -42 \text{ kJ/mol}$) και συνεπώς, σύμφωνα με την αρχή του Le Chatelier, η παραγωγή H_2 ευνοείται από τις χαμηλές θερμοκρασίες. Γι' αυτό και το αέριο, προτού εισέλθει στον Shift Reactor, περνά από τον εναλλάκτη θερμότητας.



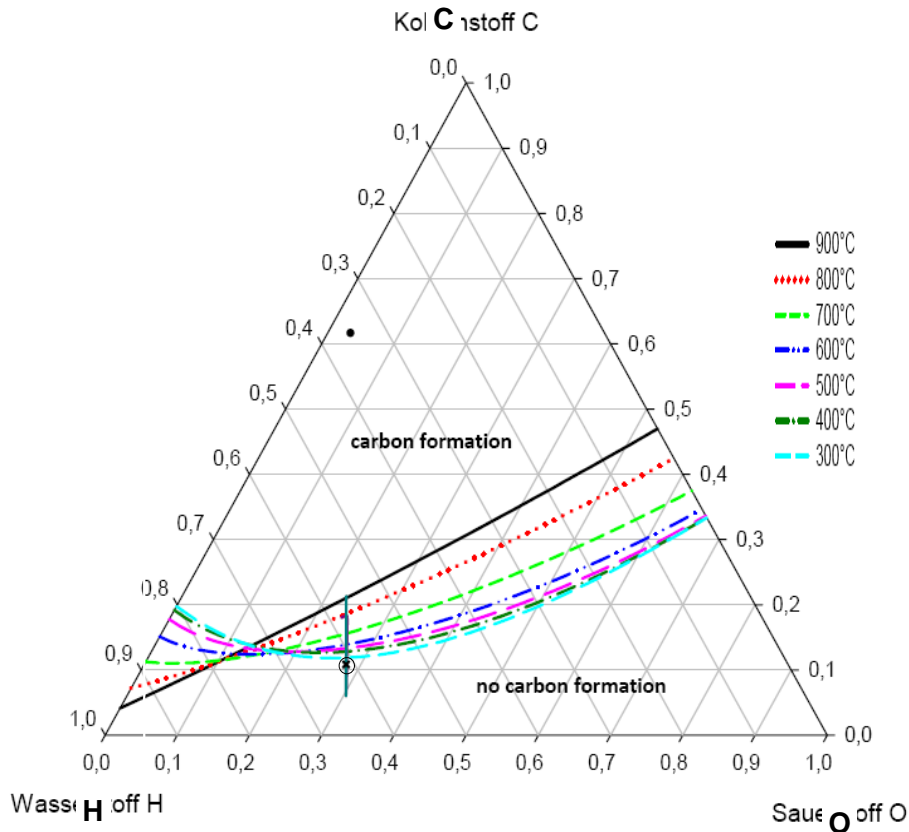
Εικόνα 5.1. Σχηματική παράσταση στο IPSE Pro για το κύκλωμα του αντιδραστήρα Shift

Ο αντιδραστήρας Shift, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα έχει τρεις εισόδους: Στη μία εισέρχεται το αέριο προϊόν της αεριοποίησης, στην άλλη το ψυκτικό μέσο και τέλος είσοδος του νερού που απαιτείται για την αντίδραση. Το προστιθέμενο νερό, που ατμοποιείται εντός του αντιδραστήρα, (αντιδρόν) μετακινεί την θέση ισορροπίας της αντίδρασης προς τα δεξιά, δηλαδή προς τα προϊόντα. Κατά συνέπεια παράγεται H_2 και καταναλώνεται CO και άρα η αναλογία $\frac{H_2}{CO}$ αυξάνεται. Σε ορισμένες περιπτώσεις, δεν χρειάζεται να προσθέσουμε καθόλου νερό, διότι η μείωση της θερμοκρασίας επαρκεί ώστε να μετακινηθεί η θέση της χημικής ισορροπίας προς τα προϊόντα και άρα να αυξηθεί η αναλογία $\frac{H_2}{CO}$ στο αέριο.

Ο αντιδραστήρας Shift είναι απαραίτητος για να δημιουργήσουμε τις απαραίτητες προϋποθέσεις για να γίνει αποτελεσματικά η μεθανοποίηση. Πιο συγκεκριμένα, πρέπει να εξασφαλίσουμε ότι δεν θα δημιουργηθεί στερεός άνθρακας, έτσι ώστε να μην καταστραφεί ο καταλύτης. Για τον πιο συχνά χρησιμοποιούμενο καταλύτη, ο οποίος είναι το νικέλιο, πρέπει να ισχύει $\frac{H_2}{CO} >$

3. Η σχέση αυτή για την σύσταση δεν ικανοποιείται συνήθως, όταν το αέριο εξέρχεται από τον αεριοποιητή. Στην περίπτωση αυτή, πρέπει το αέριο, προτού εισέλθει στον μεθανοποιητή, να διέλθει από τον Shift Reactor. Επίσης, ο αντιδραστήρας ψύχεται, ώστε να απάγεται η θερμότητα που εκλύεται.

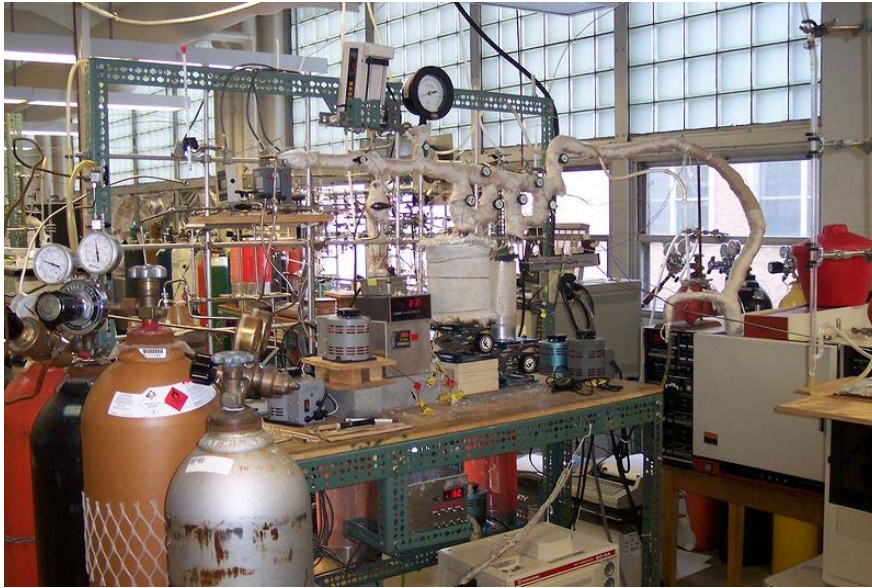
Η παρακάτω εικόνα 5.2. δείχνει ποιες πρέπει να είναι οι αναλογίες των ατόμων άνθρακα, υδρογόνου και οξυγόνου σε ισορροπία σε διάφορες θερμοκρασίες στο αέριο σύνθεσης, ώστε να μην έχουμε σχηματισμό στερεού άνθρακα.



Εικόνα 5.2. C – H – O διάγραμμα

Για παράδειγμα, το κίτρινο σημείο έχει C = 11%, H = 62% , O = 27 % και άρα, σύμφωνα με το διάγραμμα δεν παρατηρείται σχηματισμός σε θερμοκρασίες έως 300°C. Αντιθέτως, για το μαύρο σημείο η σύσταση είναι C = 62 % , H = 35 % , O = 3 % και άρα, σύμφωνα με το διάγραμμα έχουμε σχηματισμό στερεού άνθρακα ακόμα και σε θερμοκρασίες άνω των 900° C.

Η μοντελοποίηση του αντιδραστήρα μετατόπισης παρατίθεται στο παράρτημα 3.[22]



Εικόνα 5.3. Εργαστηριακός αντιδραστήρας μετατόπισης νερού – αερίου[23]

Κεφάλαιο 6. Μεθανοποίηση και μέθοδοι αυτής [24]

6.1. Ορισμοί και εφαρμογές

6.1.1 Γενικά

Η μεθανοποίηση ορίζεται γενικά ως η καταλυτική αντίδραση του υδρογόνου με μονοξείδιο ή και διοξείδιο του άνθρακα, σχηματίζοντας μεθάνιο και νερό, σύμφωνα με τις αρχές της μεθανοποίησης που θα περιγραφούν στη συνέχεια. Οι δύο κύριες εφαρμογές της μεθανοποίησης είναι:

- 1) Μεθανοποίηση για εξάλειψη οξειδίων του άνθρακα στην παραγωγή υδρογόνου : εν αντιθέσει με αυτό το τελικό στάδιο καθαρότητας, οι συγκεντρώσεις βλαβερών οξειδίων του άνθρακα είναι συγκριτικά χαμηλές και η εξώθερμη αντίδραση της μεθανοποίησης ως εκ τούτου προκαλεί μόλις μια μέτρια αύξηση της θερμοκρασίας.
- 2) Μεθανοποίηση για παραγωγή SNG (Substitute Natural Gas)). Σ' αυτή την εφαρμογή, η οποία επίσης ονομάζεται σύνθεση μεθανίου, το υδρογόνο θα μετατραπεί σε μεθάνιο όσο περισσότερο γίνεται. Εξαιτίας της ισχυρής εξώθερμης αντίδρασης και των υψηλών συγκεντρώσεων όλων των αντιδρώντων, πρέπει να ληφθούν μέτρα για τον περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας. Όσο από θερμοδυναμικής πλευράς, απαιτούνται σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες για παραγωγή μεθανίου και αντιστοίχως χαμηλή περιεκτικότητα νερού στο προϊόν. Γι αυτόν τον λόγο, απαιτούνται συστήματα πολλαπλών σταδίων.

Η εφαρμογή (1) της μεθανοποίησης πρέπει να θεωρηθεί ως μια καλά εφαρμοσμένη τεχνική με ελάχιστα περιθώρια βελτίωσης. Χρησιμοποιείται ευρέως στην παραγωγή υδρογόνου, μολονότι σήμερα συστήματα PSA (pressure-swing adsorption) για καθαρότητα υδρογόνου μονοπωλούν την αγορά. Συστήματα με καταλύτες μπορούν να φθαρούν από τις υψηλές θερμοκρασίες, λόγω των οξειδίων του άνθρακα που υπεισέρχονται ως αποτέλεσμα αιφνίδιων δυσλειτουργιών των συστημάτων καθαρισμού.

Η εφαρμογή (2), δηλαδή η παραγωγή SNG, έχει χάσει προς το παρόν το εμπορικό της ενδιαφέρον, εξ' αιτίας της ολοένα αυξανόμενης διαθεσιμότητας του φυσικού αερίου. Η τιμή του SNG δεν μπορεί ν' ανταγωνιστεί την αντίστοιχη του φυσικού αερίου.

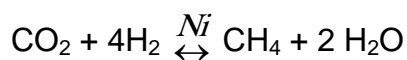
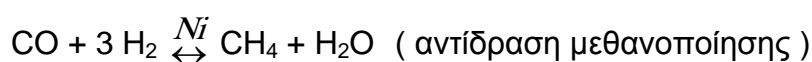
Εργοστάσια παραγωγής SNG κατέδειξαν την αξιοπιστία των διεργασιών μετατροπής νάφθας σε SNG. Ειδικές τοπικές συνθήκες, όπως αποκεντρωμένα συστήματα ή ελλιπείς δυνατότητες αποθήκευσης, μπορεί να αποτελέσουν την αιτία προσωρινής εφαρμογής εργοστασίων παραγωγής SNG. Ένα σύστημα μεθανοποίησης σε χαμηλές θερμοκρασίες (βασιζόμενα στο ρουθένιο ως καταλύτη, εν αντιθέσει με το νικέλιο που εφαρμόζεται κατά βάση) μπορεί να βρει εφαρμογή στη διαστημική τεχνολογία. Σ' αυτή την εφαρμογή, το διοξείδιο του άνθρακα του αέρα που εκπνέουμε, μεθανοποιείται σε συνδυασμό με ηλεκτρόλυση νερού και ως εκ τούτου επαναπρόσληψη οξυγόνου για τον βιολογικό κύκλο.

6.1.2.Αρχές μεθανοποίησης

Η αρχή της καταλυτικής συνθετικής παραγωγής από μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο ανακαλύφθηκε το 1902 από τους Sabatier και Senderens. Αυτή περιγράφεται με την κάτωθι ισχυρά εξώθερμη χημική αντίδραση:



Πολλές έρευνες σημειώνουν ότι ο μετασχηματισμός του διοξειδίου του άνθρακα σε μεθάνιο ενεργοποιείται από μια αντίδραση αντίστροφης μετατόπισης (reverse shift reaction) με υδρογόνο για να αποφέρει μονοξείδιο του άνθρακα και ατμό. Το μονοξείδιο του άνθρακα, που σχηματίζεται, κατόπιν αντιδρά για την πρόσδοση του μεθανίου, σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις :



Και οι δύο αντιδράσεις σχηματισμού του μεθανίου είναι ισχυρά εξώθερμες. Επίσης σημειώνεται και η απαίτηση για χαμηλή θερμοκρασία σε υψηλή πίεση ώστε να πάρουμε υψηλής περιεκτικότητας μεθάνιο.

6.1.3. Καταλύτες

Για την απομάκρυνση των οξειδίων του άνθρακα που υπάρχουν στο συνθετικό αέριο, χρησιμοποιούνται καταλύτες με περιεκτικότητα σε νικέλιο μικρότερης του 15 % κ.β.

Ενεργοποιημένη αλουμίνα, οξείδιο του μαγνησίου εκ τούτου χρησιμοποιούνται ως μέσα μεταφοράς. Για τη σύνθεση του μεθανίου από αέρια πλούσια σε μονοξείδιο του άνθρακα, χρησιμοποιούνται καταλύτες με υψηλή ποσότητα νικελίου, όμοιοι μ' αυτούς που χρησιμοποιούνται για ανασχηματισμό της νάφθας σε αέριο πλούσιο σε μεθάνιο.

Καταλύτες βασιζόμενοι στο ρουθένιο έχουν δοκιμαστεί επανειλημμένα για τη μεθανοποίηση, αλλά δεν έχουν βρει ευρεία εφαρμογή, σε σύγκριση με τους νικελιούχους καταλύτες.

6.1.4. Μεθανοποίηση ως βήμα παραγωγής καθαρού υδρογόνου

Τα οξειδία του άνθρακα είναι συχνά δηλητηριώδη στις διαδικασίες καταλυτικής υδρογόνωσης. Η ταυτόχρονη εξάλειψή τους καθίσταται δυνατή, με μέσα προερχόμενα από την ίδια τη διαδικασία της μεθανοποίησης. Η μεθανοποίηση παραμένει η κύρια κανονική μέθοδος καθαρισμού για παραγωγή συνθετικού αερίου αμμωνίας, ειδικότερα από μια δευτερεύουσα αντίδραση ανασχηματισμού. Εδώ, η παρουσία του αζώτου εμποδίζει οποιαδήποτε άλλη μέθοδο ν' αναπτυχθεί .

Σε έναν αδιαβατικό αντιδραστήρα, εμπλουτισμένο με νικελιούχο καταλύτη, το μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα μετατρέπεται με υδρογόνο σε μεθάνιο και ατμόνερο. Επειδή η θερμοκρασιακή αύξηση στον αντιδραστήρα για κάθε εκατοστό μονοξειδίου του άνθρακα είναι 70 K και αντίστοιχα 55 K για διοξείδιο του άνθρακα, η θερμοκρασία που τελικά αναπτύσσεται μπορεί να φτάσει και τους 400° C και επειδή η κλίση της θερμοκρασίας είναι αρκετά υψηλή ώστε να διακόψει τη λειτουργία στον trim heater, άλλες διαρρυθμίσεις στους εναλλάκτες θερμότητας σε συνδυασμό με την εγκατάσταση ανασχηματισμού, είναι πιθανοί όπως επίσης και ηλεκτρικοί start heaters. Το καθαρό πλέον υδρογόνο ψύχεται μέχρι ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας στον εναλλάκτη θερμότητας και σε έναν ψύκτη, ο οποίος επίσης συμπυκνώνει το μεγαλύτερο μέρος ατμού που σχηματίζεται.

6.1.5 Μεθανοποίηση «πλούσιου» αερίου

Παρόλο που η μεθανοποίηση, ως μέθοδος υψηλής καθαρότητας συνθετικού αερίου, εξάγει μόνο μικρές ποσότητες μεθανίου, η μεθανοποίηση πλούσιου αερίου και σύνθεσης μεθανίου από αέρια πλούσια σε μονοξείδιο του άνθρακα, σκόπιμα παράγει μεθάνιο. Η παραγωγή SNG με αεριοποίηση γαιάνθρακα τίθεται υπό θεώρηση ως αντικατάσταση των αέριων υδρογονανθράκων φυσικής προέλευσης όταν αυτό δεν θα'ναι διαθέσιμο σε επαρκής ποσότητες. Αντίθετα, παραγωγή μεθανίου από πλούσιο αέριο

περιορίζεται από «περιοχές» όπου υπάρχει νάφθα σε άφθονες ποσότητες και καθόλου φυσικό αέριο.

Όταν το SNG παράγεται από νάφθα, η περιεκτικότητα του μεθανίου του αερίου είναι της τάξεως του 70% κ.ο. ενώ η αντίστοιχη του υδρογόνου φτάνει το 7% κ.ο. και το διοξείδιο του άνθρακα το 25% κ.ο. Επίσης, λιγότερο από 0.5% μονοξειδίου του άνθρακα περιέχεται και ατμός από αεριοποίηση της νάφθας, που δεν έχει λάβει μέρος στην αντίδραση, ανέρχεται στο 1,30 mol H₂O ανά mol ξηρού αερίου. Ένα αέριο μίγμα τέτοια σύνθεσης δύναται να εμπλουτιστεί περαιτέρω για θερμοκρασία εισόδου γύρω στους 300° C σε έναν αδιαβατικό αξονικό αντιδραστήρα που περιέχει νικελιούχο καταλύτη ίδιο ή παρόμοιο με αυτόν που χρησιμοποιείται για τον ανασχηματισμό της νάφθας. Επειδή η ποσότητα αερίου που δεν έχει λάβει μέρος στην αντίδραση είναι μεγάλη και επειδή σχηματίζεται επιπλέον ατμός κατά την αντίδραση, ο βαθμός σχηματισμού του μεθανίου περιορίζεται στο λεγόμενο 'βήμα υγρής μεθανοποίησης'.

Μετά την ψύξη του αερίου και τη συμπύκνωση του αερίου, η περιεκτικότητα του μεθανίου μπορεί ν' αυξηθεί περισσότερο διά μέσου ενός άλλου βήματος μεθανοποίησης (βήμα ξηρής μεθανοποίησης) το οποίο μπορεί να ναι πριν ή μετά την απαιτούμενη απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα. Η ρύθμιση για την πρώτη περίπτωση παράγει μεθάνιο καλύτερης ποιότητας, αλλά ο κίνδυνος σχηματισμού άνθρακα είναι υψηλότερος εξ' αιτίας της θερμοδυναμικής πιθανότητας μιας αντίδρασης αντίστροφης μετατόπισης (reverse shift reaction) και συνακόλουθο σχηματισμό άνθρακα σύμφωνα με την αντίδραση Boudouard. Η εγκατάσταση ξηρής μεθανοποίησης κατ' αντιρροή με το σύστημα απομάκρυνσης του διοξειδίου του άνθρακα καθιστά ηπιότερες τις συνθήκες αντίδρασης, αλλά το διοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο που περιέχονται στο προϊόν αυξάνονται κατ' ελάχιστον λόγω της ανάγκης για παροχή περίσσειας διοξειδίου του άνθρακα για την αντίδραση του υδρογόνου.

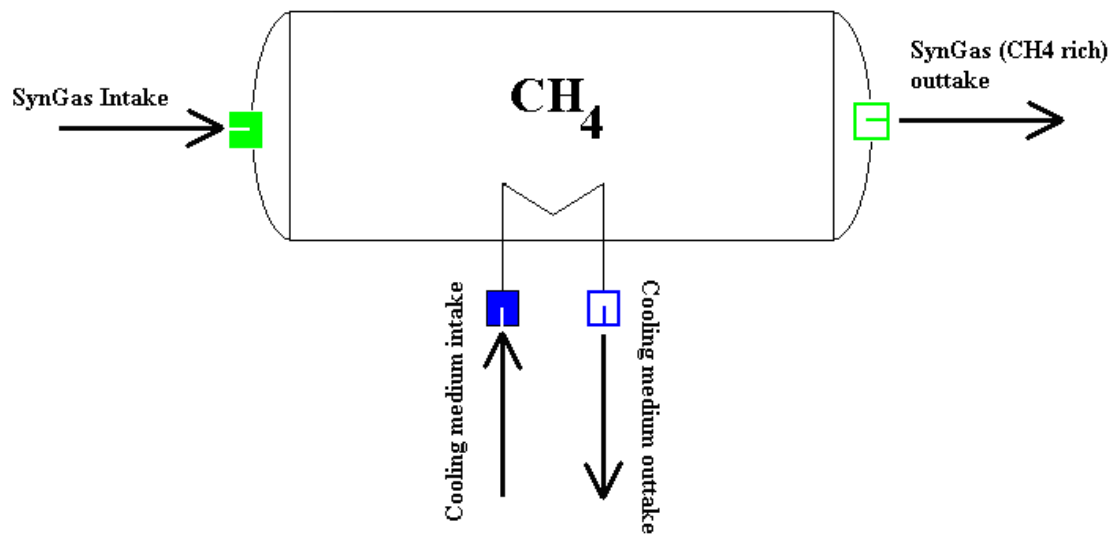
6.1.6. Μεθανοποίηση σε ρευστοποιημένη κλίνη

Εκτεταμένες έρευνες και επιδείξεις έχουν διενεργηθεί για τη μεθανοποίηση αερίων με δυσμενή σύνθεση, με λίγη ή καθόλου πρόσδοση ατμού, σε έναν ψυχόμενο αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης σε ένα στάδιο, χωρίς πρόσθετο στάδιο καθαρισμού. Οι κίνδυνοι από τον σχηματισμό άνθρακα, η απενεργοποίηση των καταλυτών λόγω υψηλής πίεσης μονοξειδίων του άνθρακα και εκτεταμένη κατανάλωση καταλυτών από τη διαδικασία της ρευστοποιημένης κλίνης, έχουν ξεπεραστεί και λειτουργία υπό πίεση μέχρι 6 MPa έχουν παρουσιαστεί επιτυχώς σε πιλοτική μονάδα παραγωγής.

6.1.7. Σύνθεση μεθανίου με περιορισμό του ατμού

Για συνθετικά αέρια με χαμηλούς στοιχειομετρικούς αριθμούς, ο ατμός πρέπει πάντα να προστίθεται για την αποφυγή σχηματισμού άνθρακα. Για βέλτιστα αποτελέσματα, η απαραίτητη ποσότητα ατμού αναμιγνύεται με ένα μέρος του παρεχόμενου αερίου με τρόπο ώστε η αύξηση της θερμοκρασίας στο πρώτο στάδιο της μεθανοποίησης περιορίζεται εντός επιτρεπτών ορίων και, έπειτα από αποβολή θερμοκρασίας, μια επιπλέον ποσότητα παρεχόμενου αερίου δεσμεύεται για το πρώτο ενδιάμεσο ρεύμα αερίου που παράγεται. Η διαδικασία quenching, αφότου ψυχθεί, επαναλαμβάνεται μέχρι να καταναλωθεί όλο το αέριο. Με την προσθήκη ατμού, η σύνθεση ισορροπίας καθενός ενδιάμεσου αερίου προϊόντος δεν είναι αρκετά ευνοϊκή για την ενεργοποίηση άμεσης παραγωγής SNG συγκεκριμένου βαθμού σε ένα στάδιο υγρής μεθανοποίησης. Η απομάκρυνση διοξειδίου του άνθρακα, ως εκ τούτου, ακολουθείται από ένα τελικό, ξηρό στάδιο.

Το σχήμα του μεθανοποιητή όπως μοντελοποιήθηκε στο κύκλωμα του IPSE Pro είναι αυτό της εικόνας 6.1. :



Εικόνα 6.1. Σχηματική απεικόνιση μοντέλου μεθανοποιητή στο IPSE-Pro™

Η μοντελοποίηση του αντιδραστήρα μεθανοποίησης παρατίθεται στο Παράρτημα 4 [22].

Κεφάλαιο 7. Δέσμευση CO₂

(MDEA) [14]

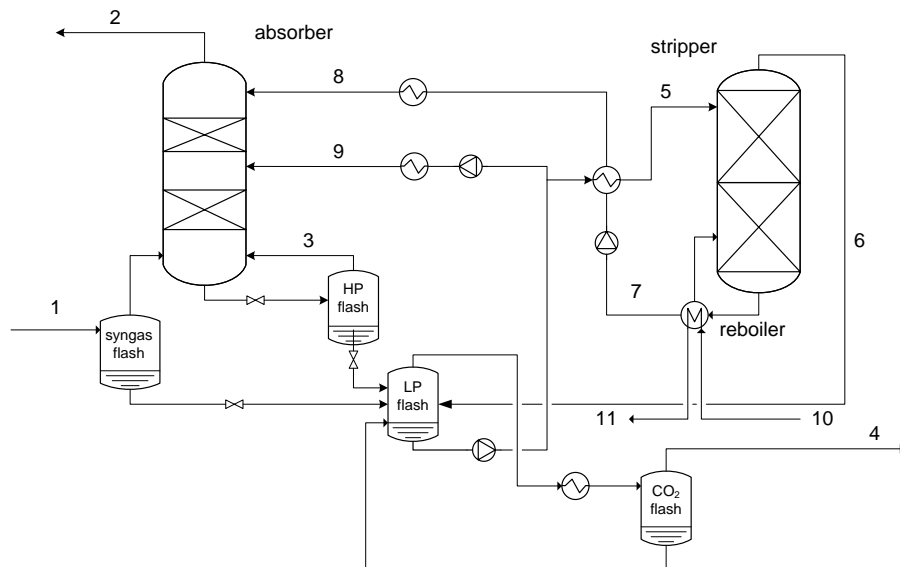
[14] Το διάλυμα MDEA (Methyl di-ethanol amine) είναι μία από τις υδατικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για χημική απορρόφηση του διοξειδίου του άνθρακα, ειδικότερα στις τεχνολογίες δέσμευσης πριν την καύση. Το MDEA έρχεται σε επαφή με τα αέρια που περιέχουν διοξείδιο του άνθρακα μέσω ενός σωλήνα απορρόφησης και το διοξείδιο του άνθρακα αραιώνεται σ' αυτό. Κατόπιν, χρησιμοποιείται ένας «αναγεννητής» για ανασύσταση του διαλύτη. Τα βασικά στοιχεία της διαδικασίας MDEA είναι :

Απορροφητήρας: σωλήνας στον οποίον το ρεύμα εισόδου καθαρίζεται από το διοξείδιο του άνθρακα από στοιχεία του διαλύματος MDEA το οποίο εισέρχεται με δύο ρεύματα, το ισχνό και το μη ισχνό διάλυμα. Το αέριο τμήμα του συνθετικού αερίου εισέρχεται στον απορροφητήρα από τον διάτρητο πυθμένα.

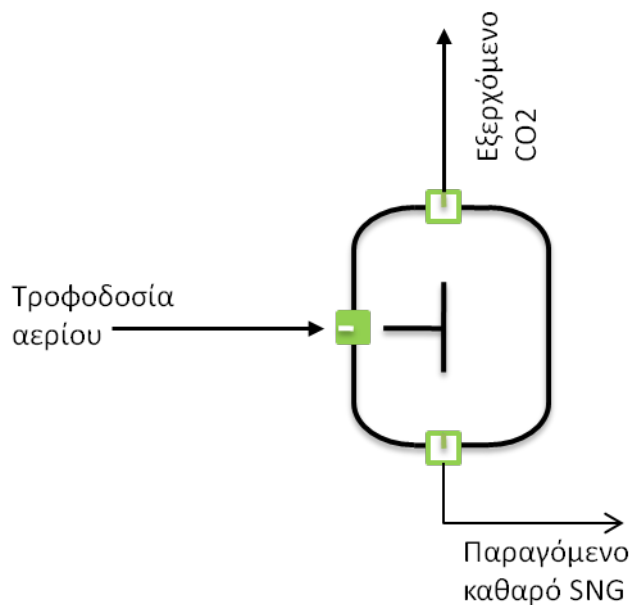
Δεξαμενές υψηλής και χαμηλής πίεσης: Μέρος της αναγέννησης του διαλύματος MDEA πραγματοποιείται σε μια δεξαμενή χαμηλής πίεσης (φυσική μέθοδος). Το αέριο ρεύμα υφίσταται περεταίρω αφύγρανση και περιέχει το τελικό ρεύμα πλούσιο σε διοξείδιο του άνθρακα. Από την άλλη πλευρά, η υπόλοιπη ποσότητα, η οποία είναι υγρής κατάστασης, διαχωρίζεται σε δύο ρεύματα: το ένα που εισέρχεται στον απορροφητήρα ως ημι-ισχνό διάλυμα, και το άλλο που εισέρχεται στον αναγεννητή για την ολική αναγέννηση του διαλύματος MDEA. Η δεξαμενή υψηλής πίεσης χρησιμοποιείται για ανακύκλωση υδρογόνου, μονοξειδίου του άνθρακα και αζώτου, πίσω στον απορροφητήρα με εκρόφηση από το πλούσιο διάλυμα.

Αναγεννητής: σωλήνας όπου πραγματοποιείται το μεγαλύτερο μέρος της αναγέννησης του MDEA (θερμικά). Το πλούσιο διάλυμα MDEA αποστάζεται

από τον πυθμένα και στάλλεται στον απορροφητήρα. Το αέριο ρεύμα που εξέρχεται από τον σωλήνα αναγέννησης αποτελείται από διοξείδιο του άνθρακα και υδρατμό. Ο υδρατμός που απαιτείται για την άνωθεν διαδικασία, μπορεί να προέλθει από την απορριπτόμενη θερμότητα του αντιδραστήρα μεθανοποίησης.



Εικόνα 7.1. Στοιχεία μονάδας δέσμευσης CO₂ με διάλυμα MDEA.



Εικόνα 7.2. Σχηματική απεικόνιση μοντέλου διαχωριστή CO₂ στο IPSE-ProTM

Η μοντελοποίηση της δέσμευσης του CO₂ παρατίθεται στο Παράρτημα 5 [22].

Κεφάλαιο 8.

Προσομοίωση μονάδων ηλεκτρο- παραγωγής με μεθανοποίηση.

Στην παρόν κεφάλαιο προσομοιώθηκε η λειτουργία ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων συνδυασμένου κύκλου χρησιμοποιώντας ως «έμμεσο» καύσιμο τον λιγνίτη και «άμεσο» καύσιμο το αέριο που παράγεται από την αεριοποίηση και μεθανοποίηση αυτού.

Η κάθε μονάδα ηλεκτροπαραγωγής αποτελείται από 3 επιμέρους τμήματα. Το τμήμα παραγωγής και διαχείρισης του αερίου, το τμήμα του βιομηχανικού αεριοστροβίλου και τέλος το τμήμα του Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας με τον αμμοστρόβιλό του.

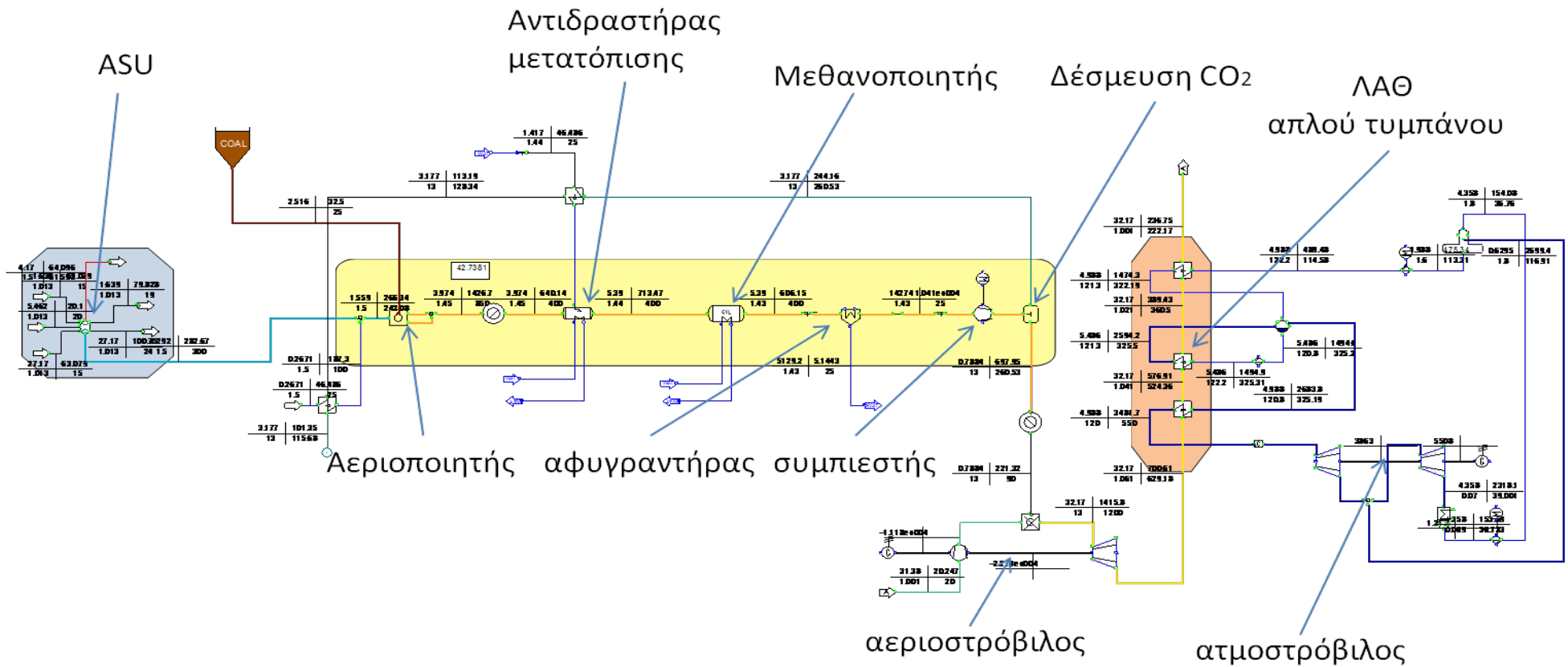
Τα κύρια στοιχεία του τμήματος παραγωγής και διαχείρισης του αερίου είναι η μονάδα διαχωρισμού του αέρα, ο αεριοποιητής, ο αντιδραστήρας μετατόπισης (Shift reactor) , ο μεθανοποιητής, ο αφυγραντήρας του αερίου, ο αεριοσυμπιεστής και το στοιχείο δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα.

Η δεύτερη κατηγορία μονάδων έχει ως βασικά στοιχεία τη μονάδα διαχωρισμού του αέρα, τον αεριοποιητή με οξυγόνο, τη συμπίεση του SynGas, την απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα και τέλος το σύστημα συνδυασμένου κύκλου με τον αεριοστροβίλο και το Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας.

Και για τις δύο κατηγορίες, βασική μέριμνα είναι η αύξηση του βαθμού απόδοσης των μονάδων. Αυτό επιτυγχάνεται κυρίως με την εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας από τις διάφορες χημικές διεργασίες και αντιδράσεις.

Για το σκοπό αυτό, σε κάθε κατηγορία κυκλωμάτων υπάρχουν διαφοροποιήσεις και προσθήκες στοιχείων, όπως προθέρμανση νερού, εκμετάλλευση της θερμότητας για λόγους συμπαραγωγής ή θέρμανσης χώρου, ακόμα βέβαια και ανάκτηση της θερμότητας μέσα σε έναν επιπλέον λέβητα, για επιπλέον ηλεκτροπαραγωγή και κατ' επέκταση αύξηση του βαθμού απόδοσης της μονάδας.

8.1. 1^η Περίπτωση Κυκλώματος (απλού τυμπάνου)



Εικόνα 8.1.1. Σχηματική περιγραφή κυκλώματος

Σύντομη περιγραφή του κυκλώματος:

Ατμοσφαιρικός αέρας εισέρχεται στη Μονάδα Διαχωρισμού του Αέρα (ASU). Από αυτή εξέρχεται οξυγόνο σε επιθυμητό βαθμό καθαρότητας άνω του 90% και άζωτο. Το οξυγόνο αναμειγνύεται με ατμό και εισέρχεται στον αεριοποιητή (gasifier) . Σ' αυτόν εισέρχεται και το ορυκτό καύσιμο (fuel silo) , που με την παρουσία του οξυγόνου αεριοποιείται και παράγεται το συνθετικό αέριο (SynGas). Αυτό λόγω της υψηλής του θερμοκρασίας διέρχεται από ένα στοιχείο απορρόφησης θερμότητας (Heat sink) , είτε για τις απαιτήσεις συμπαραγωγής είτε για θέρμανση χώρου, και έχοντας χάσει τη μισή σχεδόν θερμοκρασία εισέρχεται στον αντιδραστήρα μετατόπισης (Shift reactor) . Το αέριο, έχοντας υποστεί την πρώτη του επεξεργασία εξέρχεται από τον αντιδραστήρα μετατόπισης και εισέρχεται στον μεθανοποιητή (Methanator). Εκεί το αέριο υφίσταται την κυριότερή του επεξεργασία και εξέρχεται από αυτόν πλούσιο σε μεθάνιο (Φ.Α.). Εν συνεχεία διέρχεται από τη συσκευή απομάκρυνσης του νερού (Water remover) και το αέριο, ξηρό πλέον, συμπιέζεται (Compressor) . Πρωτού εισέλθει το SNG στον αεριοστροβίλο, διέρχεται από τη συσκευή απομάκρυνσης του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ Absorbent). Το διοξείδιο του άνθρακα, λόγω της πρότερης συμπίεσης του SNG, είσαι σε πολύ υψηλή θερμοκρασία. Έτσι αφού περάσει από έναν εναλλάκτη θερμότητας διέρχεται από ένα δεύτερο θερμοστοιχείο και εξέρχεται από αυτό σε υγρή κατάσταση. Το CO₂-free SNG είναι πλέον το καύσιμο που θα τροφοδοτήσει το θάλαμο καύσης του αεριοστροβίλου. Τα θερμά καυσαέρια που παράγονται και εκτονώνονται στον αεριοστροβίλο, παράγοντας έτσι ηλεκτρική ενέργεια, και κατόπιν διέρχονται από τον Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας (HRSG single drum) , απλού τυμπάνου, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το κύκλωμα νερού-ατμού.

Αναλυτικότερη περιγραφή του κυκλώματος:

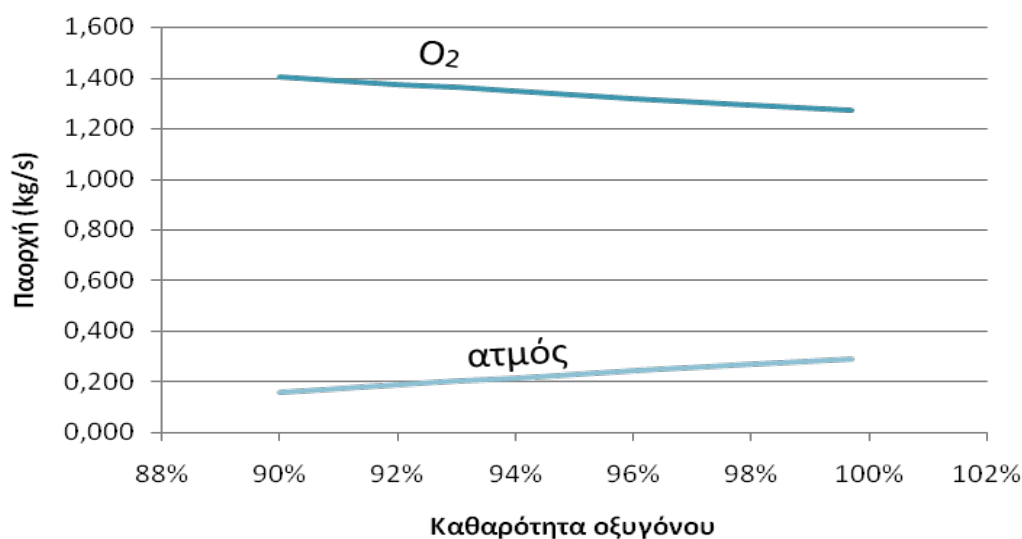
Ο αέρας εισέρχεται στην ASU και ανάλογα με την επιθυμητή καθαρότητα του παραγόμενου οξυγόνου, ανάλογες είναι οι απώλειες της μονάδας. Υψηλότερη καθαρότητα οξυγόνου επιφέρει μεγαλύτερες ενεργειακές ανάγκες για συμπίεση του αέρα και κατ'επέκταση μεγαλύτερες ενεργειακές

απώλειες στο κύκλωμα. Το οξυγόνο που παράγεται από τη μονάδα είναι 300°C και αυτό μαζί με ατμό θερμοκρασίας 100°C τροφοδοτεί τον αεριοποιητή οξυγόνου. Η θερμότητα για την παραγωγή του ατμού παρέχεται από το ρεύμα διοξειδίου του άνθρακα. Η θερμοκρασία αεριοποίησης πρέπει να είναι στους 850°C και λόγω αυτού του περιορισμού, η παροχή του παραγόμενου οξυγόνου και του προστιθέμενου ατμού, με δεδομένο το λάμδα του αεριοποιητή, αποτελούν τις μεταβλητές του συστήματος αεριοποίησης. Έτσι, ανάλογα με την επιθυμητή καθαρότητα, καθορίζεται η παροχή του οξυγόνου και του ατμού που συνθέτουν το μίγμα του μέσου που εισέρχεται στον αεριοποιητή για την επίτευξη της θερμοκρασίας αεριοποίησης των 850°C. Ο πίνακας 8.1.1 αποτυπώνει ακριβώς αυτή τη συσχέτιση:

Πίνακας 8.1.1. Συσχέτιση καθαρότητας οξυγόνου με την παροχή οξυγόνου και πρόσθετου ατμού εισερχόμενα στον αεριοποιητή

Καθαρότητα οξυγόνου	Παροχή οξυγόνου (kg/sec)	Παροχή πρόσθετου ατμού (kg/sec)
90%	1,403	0,156
91%	1,389	0,171
92%	1,374	0,186
93%	1,360	0,2
94%	1,346	0,214
95%	1,332	0,228
96%	1,318	0,241
98%	1,292	0,267
99,7%	1,271	0,288

Και γραφικά:



Διάγραμμα 8.1.1. Συσχέτιση καθαρότητας – παροχής οξυγόνου και ατμού

Η καμπύλη αυτή είναι απόλυτα λογική και δικαιολογημένη. Μεγαλύτερη καθαρότητα οξυγόνου, προϋποθέτει έξοδο αυτού σε μεγαλύτερα επίπεδα πίεσης και κατ' επέκταση και θερμοκρασίας. Άρα για να διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία αεριοποίησης στους 850°C, θα πρέπει η άνοδος της θερμοκρασίας του παραγόμενου οξυγόνου να αντισταθμίζεται με την πτώση της παροχής του. Επίσης, πτώση της παροχής οξυγόνου επιφέρει την αύξηση της παροχής του ατμού, ως παροχή υδρογόνου και κατ'επέκταση οξυγόνου. Επίσης αυτό συμβάλλει στη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας αεριοποίησης. Οι ενεργειακές ανάγκες της ASU, κυμαίνονται γύρω στο 1 MW.

Στη συνέχεια το μίγμα νερού και οξυγόνου εισέρχεται στον αεριοποιητή όπου εκεί συντελείται η αεριοποίηση του γαιάνθρακα. Ο στοιχειομετρικός λόγος λειτουργίας του αεριοποιητή είναι 0,4.

Για τη μελέτη όλων των κυκλωμάτων, χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σύσταση γαιάνθρακα:

- C : 53,6 % w/w
- H : 3,9 % w/w
- N : 0,6 % w/w
- O : 19,2 % w/w
- S : 0,35 % w/w
- Υγρασία : 18,85 % w/w
- Τέφρα : 3,5 % w/w

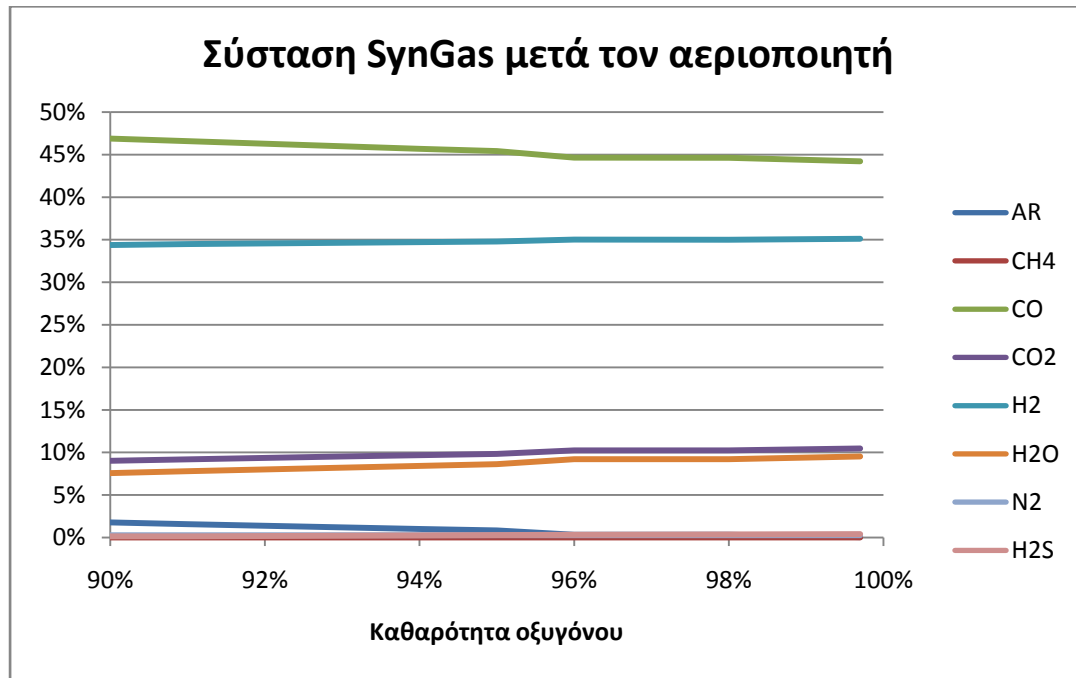
Το συνθετικό αέριο που παράγεται είναι θερμοκρασίας 850°C, πλούσιο σε μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα.

Πιο συγκεκριμένα η κατά μάζα σύσταση του αερίου, ανάλογα με την καθαρότητα του οξυγόνου που έχει εισέλθει στον αεριοποιητή, παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα 8.1.2:

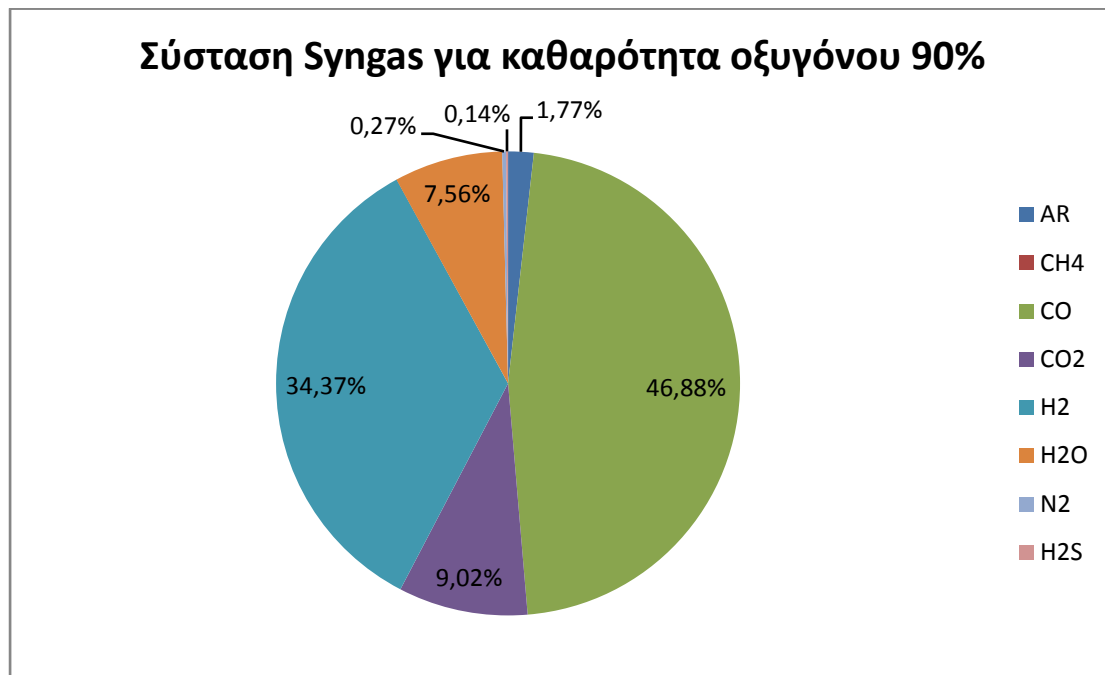
Πίνακας 8.1.2. Κατά μάζα σύσταση συνθετικού αερίου ανάλογα με την καθαρότητα του παρεχόμενου οξυγόνου κατά την έξοδο του αεριοποιητή

Καθαρότητα οξυγόνου	90%	91%	92%	93%	94%	95%	96%	98%	99,70%
AR	1,77%	1,57%	1,38%	1,19%	1,01%	0,83%	0,32%	0,32%	0,05%
CH₄	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
CO	46,88%	46,58%	46,27%	45,97%	45,69%	45,41%	44,64%	44,63%	44,22%
CO₂	9,02%	9,19%	9,36%	9,52%	9,68%	9,83%	10,25%	10,25%	10,47%
H₂	34,37%	34,47%	34,56%	34,63%	34,71%	34,78%	35,01%	34,99%	35,10%
H₂O	7,56%	7,78%	7,99%	8,20%	8,41%	8,61%	9,20%	9,20%	9,52%
N₂	0,27%	0,27%	0,27%	0,27%	0,27%	0,27%	0,27%	0,27%	0,27%
H₂S	0,14%	0,14%	0,17%	0,21%	0,25%	0,28%	0,32%	0,35%	0,39%

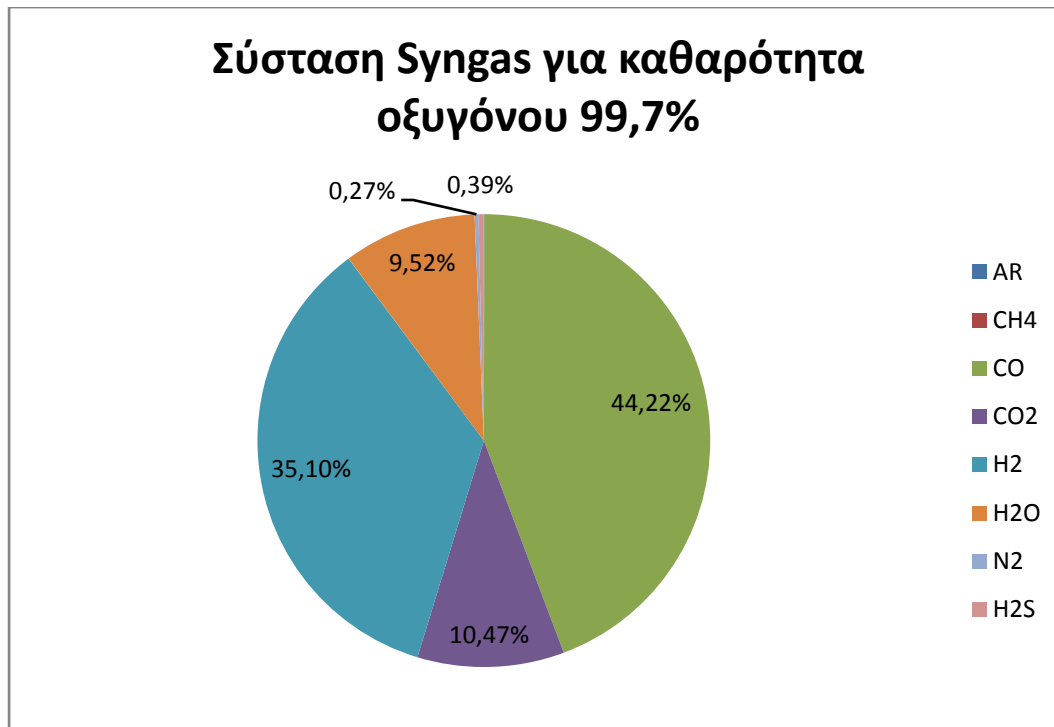
Και πιο ποιοτικά στα παρακάτω διαγράμματα 8.1.2, 8.1.3, 8.1.4 :



Διάγραμμα 8.1.2. Σύνθεση συνθετικού αερίου μετά τον αεριοποιητή συναρτήσει της καθαρότητας του οξυγόνου



Διάγραμμα 8.1.3. Σύνθεση συνθετικού αερίου για καθαρότητα οξυγόνου 90%



Διάγραμμα 8.1.4. Σύνθεση συνθετικού αερίου για καθαρότητα οξυγόνου 99,7%

Το συνθετικό αυτό αέριο αποτελεί την πρώιμη μορφή του αερίου καυσίμου που θα χρησιμοποιηθεί στον αεριοστρόβιλο. Λόγω της υψηλής του θερμοκρασίας το SynGas έχει 5,7 MW περίπου θερμικής ενέργειας και λόγω της σύνθεσής του 42,8 MW χημικής ενέργειας.

Ένα μέρος της θερμικής ενέργειας του αερίου λόγω της θερμοκρασίας του μπορεί να εκμεταλλευθεί για ανάγκες συμπαραγωγής ή θέρμανσης χώρου και γι'αυτό μετά τον αεριοποιητή και πριν το στάδιο επεξεργασίας του, το αέριο διέρχεται από ένα θερμικό στοιχείο απορρόφησης θερμότητας και το αέριο στην έξοδό του είναι στη θερμοκρασία των 400 °C. Η θερμική ενέργεια που αποδίδεται στο θερμικό αυτό στοιχείο είναι περίπου 3 MW.

Το αέριο εισέρχεται στον αντιδραστήρα μετατόπισης. Εκεί, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, το μονοξείδιο του άνθρακα του αερίου αντιδρά με το πρόσθετο νερό που εισέρχεται στον αντιδραστήρα και παράγεται διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο.

Η εξίσωση είναι η εξής : $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$

Το νερό που προστίθεται στον αντιδραστήρα έχει θερμοκρασία 180°C. Η θέρμανσή του από τους 25°C στους 180°C έγινε μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας, δια του θερμού ρεύματος του CO₂ που θα περιγραφεί στη συνέχεια.

Το συνθετικό αέριο κατά την έξοδό του από τον αντιδραστήρα μετατόπισης έχει πλέον κατ' όγκο περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα απ' ότι μονοξείδιο, λόγω της αντίδρασης μετατόπισης, συγκριτικά με το συνθετικό αέριο στην είσοδό του.

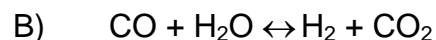
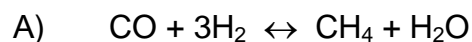
Αυτό φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα 8.1.3:

Πίνακας 8.1.3. Κατά μάζα σύνθεση συνθετικού αερίου μετά τον αντιδραστήρα μετατόπισης συναρτήσει της καθαρότητας του οξυγόνου

Καθαρότητα οξυγόνου	90%	91%	92%	93%	94%	95%	96%	98%	99,70%
AR	1,27%	1,13%	0,99%	0,85%	0,72%	0,60%	0,47%	0,23%	0,03%
CH₄	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
CO	10,26%	10,12%	9,99%	9,86%	9,73%	9,61%	9,50%	9,28%	9,10%
CO₂	29,80%	29,87%	29,93%	29,99%	30,05%	30,10%	30,15%	30,25%	30,32%
H₂	47,98%	48,01%	48,02%	48,02%	48,02%	48,02%	48,02%	48,03%	48,04%
H₂O	10,40%	10,58%	10,75%	10,91%	11,08%	11,24%	11,40%	11,71%	11,97%
N₂	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%	0,19%
H₂S	0,10%	0,10%	0,13%	0,17%	0,20%	0,24%	0,27%	0,31%	0,34%

Λόγω του συστήματος υδρόψυξης του αντιδραστήρα, το αέριο εξέρχεται από αυτόν με σταθερή θερμοκρασία, αυτή των 400°C. Στη συνέχεια εισέρχεται στην «καρδιά του συστήματος», όπου είναι ο μεθανοποιητής.

Στο μεθανοποιητή συντελούνται οι δύο βασικές χημικές αντιδράσεις :



Βάσει αυτών των χημικών αντιδράσεων, το μονοξείδιο του άνθρακα που 'χε παραμείνει στο αέριο μετά τον αντιδραστήρα μετατόπισης αντιδρά με 3 mol υδρογόνου και με 1 mol νερού. Από τη δεύτερη αντίδραση παράγεται υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα ενώ από την πρώτη μεθάνιο και νερό.

Ποσοτικά, για το κύκλωμα αυτό, φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 8.1.4:

Πίνακας 8.1.4. Πρώιμη σύνθεση SNG κατά την έξοδο από τον μεθανοποιητή συναρτήσει της καθαρότητας του οξυγόνου

Καθαρότητα οξυγόνου	90%	91%	92%	93%	94%	95%	96%	98%	99,70%
AR	1,71%	1,52%	1,34%	1,15%	0,98%	0,80%	0,64%	0,31%	0,05%
CH₄	17,66%	17,62%	17,58%	17,54%	17,50%	17,47%	17,46%	17,46%	17,40%
CO	0,64%	0,63%	0,62%	0,61%	0,61%	0,60%	0,58%	0,56%	0,55%
CO₂	35,91%	35,84%	35,76%	35,68%	35,61%	35,54%	35,47%	35,34%	35,26%
H₂	7,53%	7,51%	7,50%	7,47%	7,46%	7,43%	7,32%	7,13%	7,09%
H₂O	36,15%	36,49%	36,79%	37,11%	37,40%	37,71%	38,06%	38,73%	39,19%
N₂	0,26%	0,26%	0,26%	0,26%	0,26%	0,26%	0,26%	0,26%	0,26%
H₂S	0,13%	0,13%	0,15%	0,16%	0,18%	0,19%	0,21%	0,22%	0,21%

Επίσης λόγω του συστήματος ψύξης του αντιδραστήρα το αέριο εξέρχεται από αυτόν στην ίδια θερμοκρασία των 400°C.

Στη συνέχεια το αέριο (πρώιμη κατάσταση του SNG καυσίμου), διέρχεται από έναν αφυγραντήρα, ο οποίος του απορροφά το μεγαλύτερο μέρος του νερού που έχει. Αυτός λειτουργεί και σαν ψυκτική μηχανή, με αποτέλεσμα το αέριο να εξέρχεται από αυτόν στη θερμοκρασία των 25°C.

Κατόπιν, το αέριο συμπιέζεται μέχρι τα 13 bar με αποτέλεσμα και την άνοδο της θερμοκρασίας σε 257°C – 286°C. Οι ενεργειακές ανάγκες για τη λειτουργία του συμπιεστή ανέρχονται στα 1,28 MW – 1,48 MW.

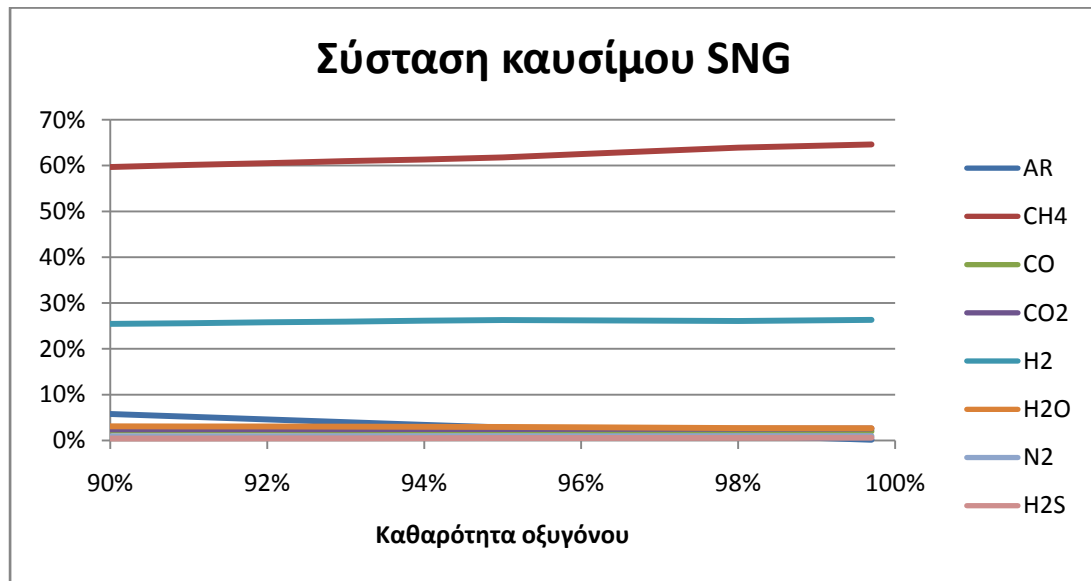
Το συμπιεσμένο πλέον αέριο, προτού εισέλθει στο θάλαμο καύσης του αεριοστροβίλου, υφίσταται απομάκρυνση της ποσότητας του διοξειδίου του άνθρακα που εμπεριέχεται σε αυτό. Αυτό γίνεται μέσα στον CO₂ separator. Έτσι πλέον έχουμε το SNG σαν καθαρό καύσιμο, ενέργειας 33MW. Το καύσιμο όμως είναι σε πολύ υψηλή θερμοκρασία, απαγορευτική για είσοδό του στο θάλαμο καύσης του αεριοστροβίλου. Γι'αυτό ένα μέρος της θερμικής ενέργειας του ζεστού καυσίμου απάγεται μέσω ενός θερμικού στοιχείου απορρόφησης θερμότητας, με αποτέλεσμα το αέριο καύσιμο να εισάγεται πλέον στο θάλαμο καύσης του αεριοστροβίλου με θερμοκρασία 90°C.

Η σύνθεση του καυσίμου που τροφοδοτεί το θάλαμο καύσης του αεριοστροβίλου παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα 8.1.5:

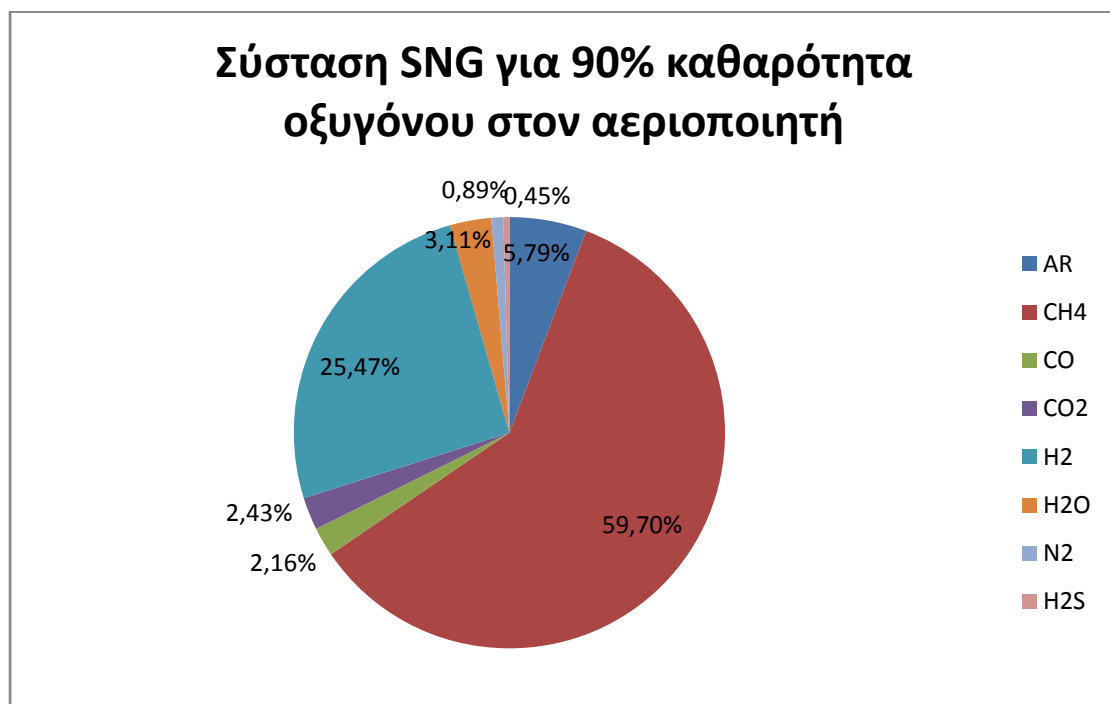
Πίνακας 8.1.5. Σύνθεση αέριου καυσίμου SNG συναρτήσει της καθαρότητας του οξυγόνου

Καθαρότητα οξυγόνου	90%	91%	92%	93%	94%	95%	96%	98%	99,70%
AR	5,79%	5,20%	4,60%	4,01%	3,43%	2,85%	2,28%	1,14%	0,17%
CH₄	59,70%	60,16%	60,53%	60,98%	61,34%	61,79%	62,51%	63,90%	64,61%
CO	2,16%	2,15%	2,14%	2,13%	2,13%	2,12%	2,09%	2,04%	2,03%
CO₂	2,43%	2,45%	2,46%	2,48%	2,50%	2,51%	2,54%	2,59%	2,62%
H₂	25,47%	25,62%	25,83%	25,96%	26,17%	26,29%	26,22%	26,09%	26,33%
H₂O	3,11%	3,07%	3,06%	3,02%	3,01%	2,97%	2,88%	2,71%	2,67%
N₂	0,89%	0,90%	0,90%	0,91%	0,91%	0,92%	0,93%	0,95%	0,96%
H₂S	0,45%	0,46%	0,48%	0,50%	0,52%	0,54%	0,57%	0,59%	0,62%

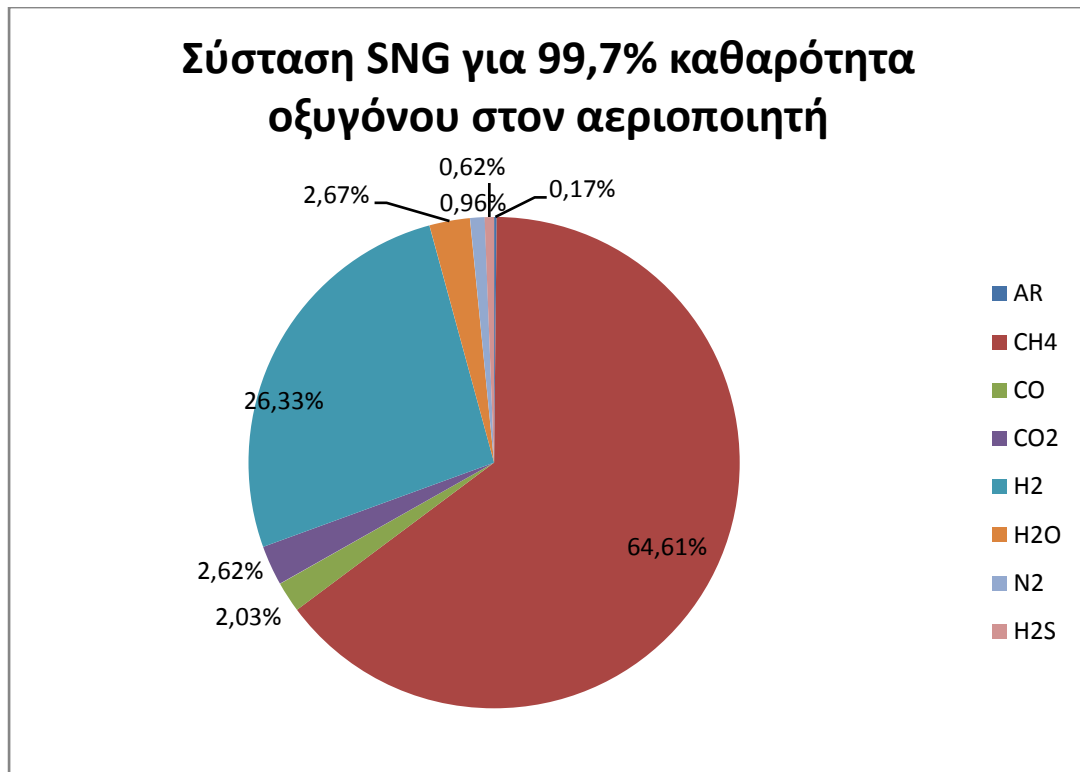
Ποιοτικά και στα παρακάτω διαγράμματα:



Διάγραμμα 8.1.5. Σύνθεση καυσίμου SNG συναρτήσει της καθαρότητας του οξυγόνου



Διάγραμμα 8.1.6. Σύνθεση καύσιμου SNG συναρτήσει καθαρότητας οξυγόνου 90%



Διάγραμμα 8.1.7. Σύνθεση καύσιμου SNG συναρτήσει καθαρότητας οξυγόνου 99,7%

Το διοξείδιο του άνθρακα που απομακρύνθηκε από το αέριο είναι υψηλής θερμοκρασίας, όμοιας αυτής του SNG που τροφοδοτεί τον αεριοστρόβιλο. Η θερμική του αυτή ενέργεια αξιοποιείται αρχικά στη θέρμανση του νερού του αντιδραστήρα μετατόπισης από τους 25°C στους 180°C . Το ρεύμα του μονοξειδίου του άνθρακα μετά τον εναλλάκτη έχει 150°C , έτσι επιδέχεται περεταίρω εκμετάλλευση της θερμικής του ενέργειας. Έτσι μεσολαβεί ένα θερμικό στοιχείο απορρόφησης θερμικής ενέργειας, σε βαθμό που το εξερχόμενο διοξείδιο του άνθρακα να έχει θερμοκρασία -30°C . Η λογική για την τιμή αυτή της θερμοκρασίας είναι στην δυνατότητα αποθήκευσης του διοξειδίου του άνθρακα σε υγρή μορφή, μετά την απομάκρυνσή του από τη μονάδα.

Το καύσιμο που εισέρχεται είναι πλούσιο σε μεθάνιο ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία της σύνθεσής του ενυπάρχουν σε πολύ μικρότερες ποσότητες. Μια επιπλέον παρατήρηση είναι η μεταβολή της χημικής ενέργειας του αερίου. Στην έξοδό του από τον αεριοποιητή έχει 43 MW ενώ το καθαρό καύσιμο που τροφοδοτεί τον θάλαμο καύσης του αεριοστρόβιλου έχει ενέργεια 33 MW, δηλαδή λιγότερη κατά περίπου 10 MW.

Το SNG καίγεται στον θάλαμο καύσης του αεριοστροβίλου, και έχοντας δεδομένη τη θερμοκρασία εξόδου από αυτόν 1200°C και το καυσαέριο που παράγεται, εκτονώνεται παράγοντας 10,7 – 10,8 MW ηλεκτρική ενέργεια. Από τον αεριοστρόβιλο το καυσαέριο εξέρχεται με θερμοκρασία 629°C και θερμικής ενέργειας 22,9 MW, διέρχεται από τον Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας. Η ενέργεια που αποδίδει στον λέβητα είναι 15,2 MW και εξέρχεται από αυτόν στην ατμόσφαιρα στη θερμοκρασία των 222°C.

Τα 15,2 MW αποδιδόμενης θερμικής ενέργειας καταναλώνονται στην προθέρμανση, ατμοποίηση και υπερθέρμανση του νερού. Έτσι έχουμε παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης (120bar) και υψηλής θερμοκρασίας (550°C), ο οποίος αντίστοιχα εκτονώνεται στον αμοστρόβιλο για την παραγωγή 5,4 MW ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ενεργειακές ανάγκες για την αύξηση της πίεσης του τροφοδοτικού νερού από τις αντλίες είναι σχεδόν μηδαμινές και ανέρχονται στα 110 kW.

Η σύνθεση του καυσαερίου είναι από τα βασικότερα ζητούμενα της έρευνας που αφορά την τεχνολογία χρήσης οξυγόνου στην αεριοποίηση αλλά και στην καύση.

Η σύνθεση του καυσαερίου σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Ipse Pro παρατίθεται στον παρακάτω πίνακα 8.1.6:

Πίνακας 8.1.6. Σύνθεση καυσαερίου συναρτήσει καθαρότητας οξυγόνου στον αεριοποιητή

Καθαρότητα	90 %	91 %	92 %	93 %	94 %	95 %	96 %	98 %	99,7 %
AR	1,22%	1,19%	1,16%	1,12%	1,09%	1,06%	1,03%	0,97%	0,93%
CO₂	3,42%	3,42%	3,42%	3,42%	3,42%	3,42%	3,42%	3,43%	3,43%
H₂O	9,23%	9,23%	9,23%	9,23%	9,23%	9,23%	9,22%	9,20%	9,20%
N₂	73,51%	73,54%	73,57%	73,60%	73,62%	73,65%	73,68%	73,74%	73,78%
O₂	12,59%	12,60%	12,60%	12,61%	12,62%	12,62%	12,63%	12,64%	12,65%
SO₂	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%

Για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης της συνολικής εγκατάστασης θα συμπεριληφθεί η ηλεκτροπαραγωγή, τόσο από τον αεριοστρόβιλο όσο και από τον ατμοστρόβιλο. Ως ενεργειακές απώλειες θεωρούνται οι απώλειες στη μονάδα διαχωρισμού του αέρα (ASU) για τη συμπίεση αυτού, οι απώλειες στο συμπιεστή του αερίου και στις αντλίες του κυκλώματος νερού – ατμού. Έτσι, έχοντας στον αριθμητή το ενεργειακό κέρδος και τις απώλειες στον παρονομαστή έχουμε τα 50MW αρχικού ορυκτού καυσίμου στη μονάδα. Έτσι προκύπτει ο συνολικός βαθμός απόδοσης της μονάδας ο οποίος φυσικά μεταβάλλεται ανάλογα με την καθαρότητα του οξυγόνου που τροφοδοτεί τον αεριοποιητή.

Για τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης μόνο της μονάδας συνδυασμένου κύκλου, στον αριθμητή αθροίζεται η ηλεκτροπαραγωγή του αεριοστροβίλου και του ατμοστροβίλου, μειωμένη κατά τις απώλειες των τροφοδοτικών αντλιών και στον παρονομαστή τα 33 MW του καυσίμου SNG που τροφοδοτεί τον κύκλο. Ο πίνακας 8.1.7 παρουσιάζει τους ηλεκτρικούς βαθμούς απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και της συνολικής μονάδας αντίστοιχα.

Πίνακας 8.1.7. Τιμές ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και μονάδας για κάθε τιμή καθαρότητας τροφοδοτούμενου οξυγόνου

Καθαρότητα οξυγόνου	Ηλεκτρ.β.α. Συνδ. κύκλου	Ηλεκτρ. β.α. μονάδας
90,0%	47,83%	26,63%
91,0%	47,83%	26,63%
92,0%	47,82%	26,62%
93,0%	47,81%	26,61%
94,0%	47,81%	26,60%
95,0%	47,80%	26,60%
96,0%	47,79%	26,61%
98,0%	47,77%	26,67%
99,7%	47,76%	26,63%

Στη συνέχεια έγιναν δοκιμές στο ίδιο θερμοηλεκτρικό κύκλωμα, μεταβάλλοντας την πίεση του παραγόμενου υπέρθερμου ατμού έχοντας σταθερή τη θερμοκρασία του στους 550°C και αντίστοιχα με σταθερή την πίεση στα 120 bar, μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία του. Η καθαρότητα του οξυγόνου είναι σταθερή και ίση με 95%.

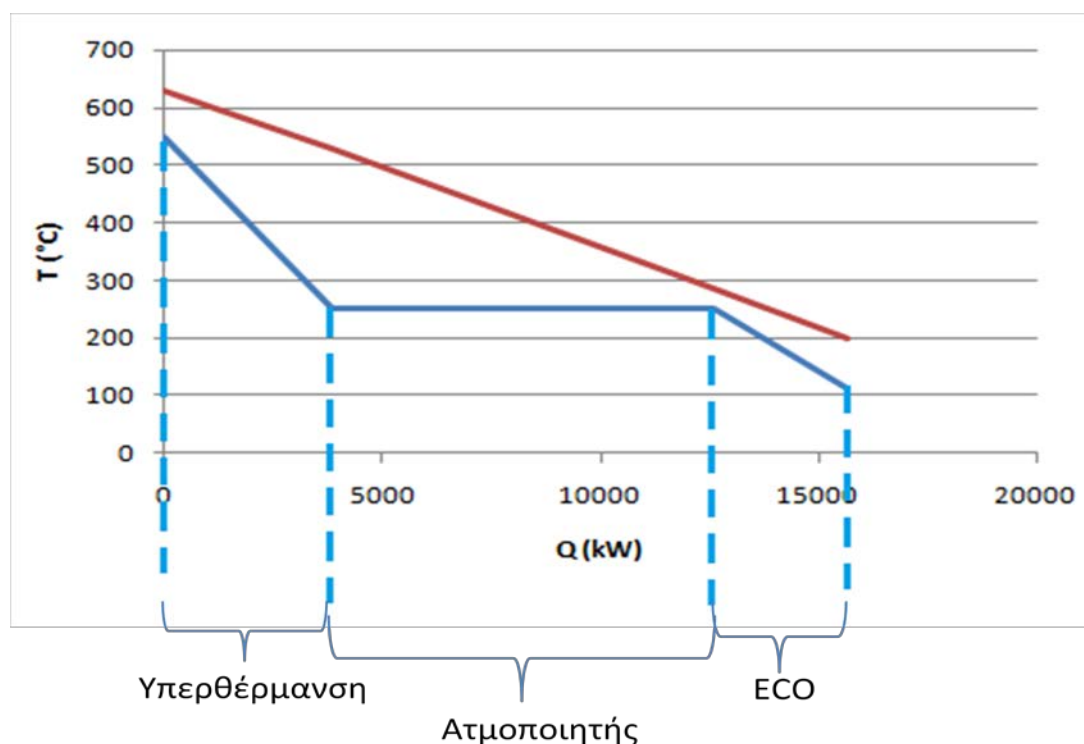
Έτσι λοιπόν με σταθερή τη θερμοκρασία του υπέρθερμου ατμού στους 550°C, προκύπτει ο Πίνακας 8.1.8.

Πίνακας 8.1.8. Ηλεκτρικοί βαθμοί απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και μονάδας για διαφορετική πίεση υπέρθερμου ατμού 550°C.

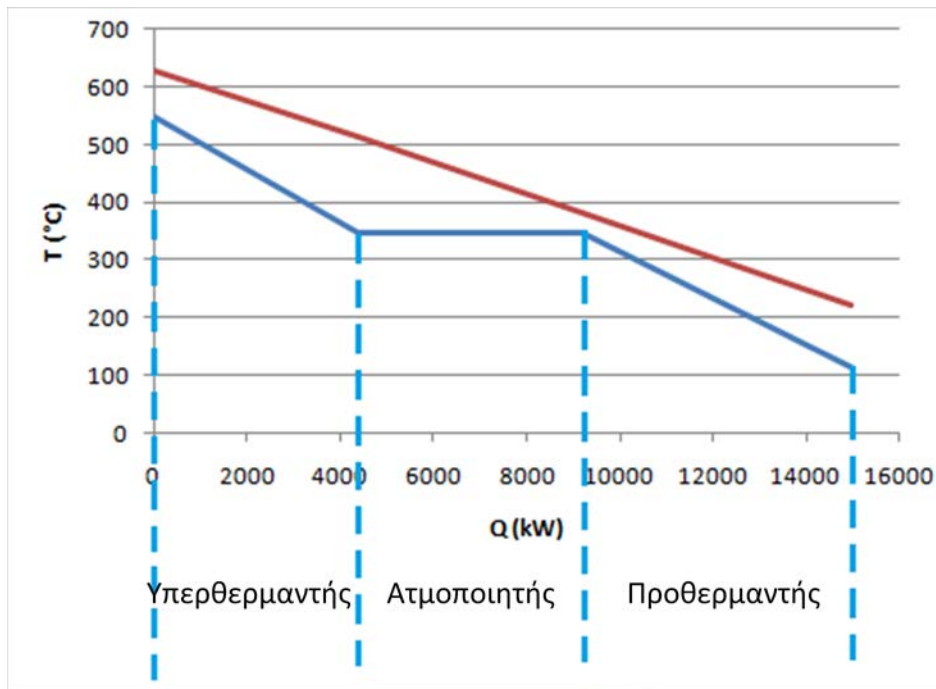
Πίεση (bar)	Ηλεκτρικός Β.Α. συνδυασμένου κύκλου (%)	Ηλεκτρικός β.α. Μονάδας (%)
40	47,20%	26,29%
80	47,55%	26,52%
100	47,66%	26,59%
120	47,77%	26,67%
140	47,91%	26,76%
160	48,07%	26,87%

Εξετάζοντας τα στοιχεία του Πίνακα 8.1.8 παρατηρείται ελάχιστη αύξηση τόσο του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου όσο και ολόκληρης της μονάδας.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα Q-T του λέβητα τόσο για πίεση 40 bar όσο και για πίεση 160 bar του υπέρθερμου ατμού.



Διάγραμμα 8.1.8. Q-T διάγραμμα για πίεση 40 bar υπέρθερμου ατμού 550°C



Διάγραμμα 8.1.9. Q-T διάγραμμα για πίεση 160 bar υπέρθερμου ατμού 550°C

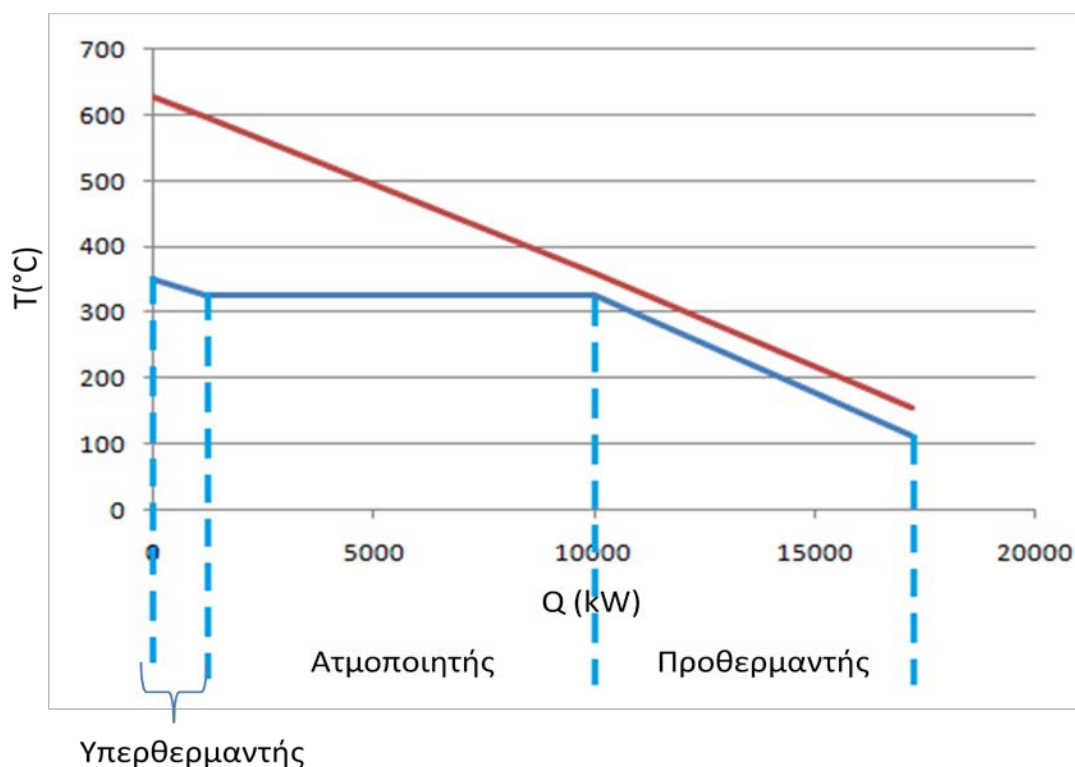
Παρατηρείται μεγαλύτερη απαγωγή θερμικής ενέργειας για την υπερθέρμανση του νερού στο κύκλωμα πίεσης 160 bar σε σύγκριση με αυτό των 40 bar. Αυτό έχει ως συνέπεια την καλύτερη εκμετάλλευσή της θερμότητας αυτής και κατά συνέπεια καλύτερος βαθμός απόδοσης, όπως προκύπτει και από τον Πίνακα 8.1.8.

Αντιστοίχως, μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία του υπέρθερμου ατμού διατηρώντας σταθερή την πίεσή του στα 120 bar, προκύπτει ο Πίνακας 8.1.9.

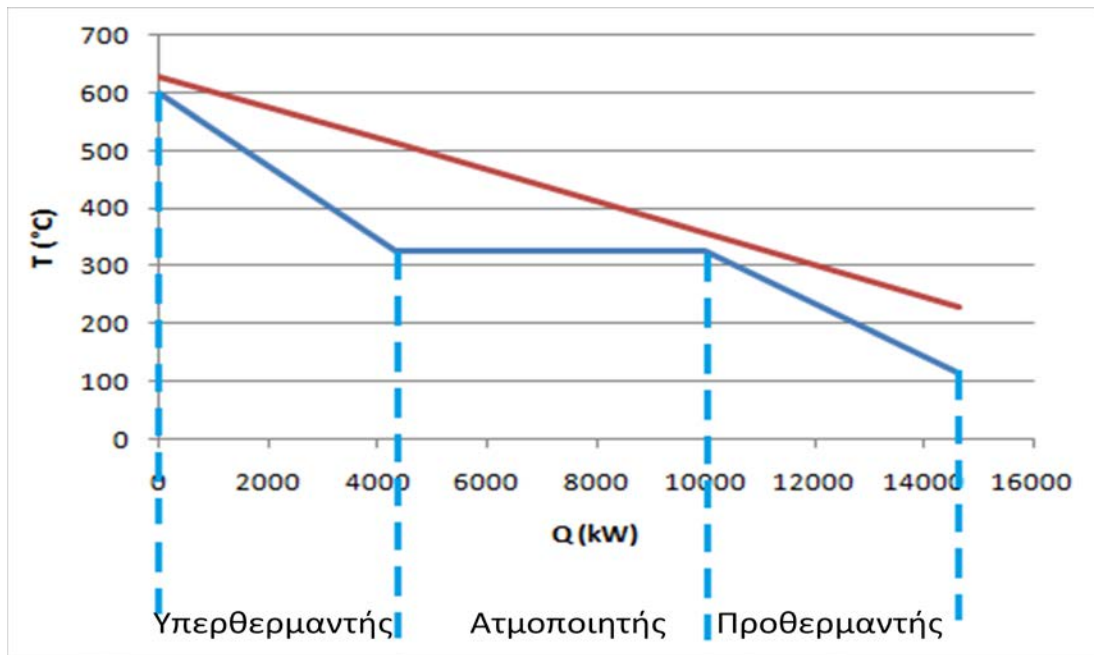
Πίνακας 8.1.9. Ηλεκτρικός β.α. συνδυασμένου κύκλου και μονάδας αντίστοιχα για σταθερή πίεση υπέρθερμου ατμού 120 bar

Θερμοκρασία (°C)	Ηλεκτρικός Β.Α. συνδυασμένου κύκλου (%)	Ηλεκτρικός Β.Α. μονάδας (%)
350	48,89%	27,40%
400	48,30%	27,01%
450	48,02%	26,83%
500	47,86%	26,72%
550	47,77%	26,67%
600	47,76%	26,66%

Παρατηρείται ότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας του υπέρθερμου ατμού, μειώνεται ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης τόσο του συνδυασμένου κύκλου όσο και κατ' επέκταση όλης της μονάδας. Ποιοτικά, αυτό φαίνεται συγκρίνοντας τα αντίστοιχα διαγράμματα Q – T για τους 350°C και 600°C.



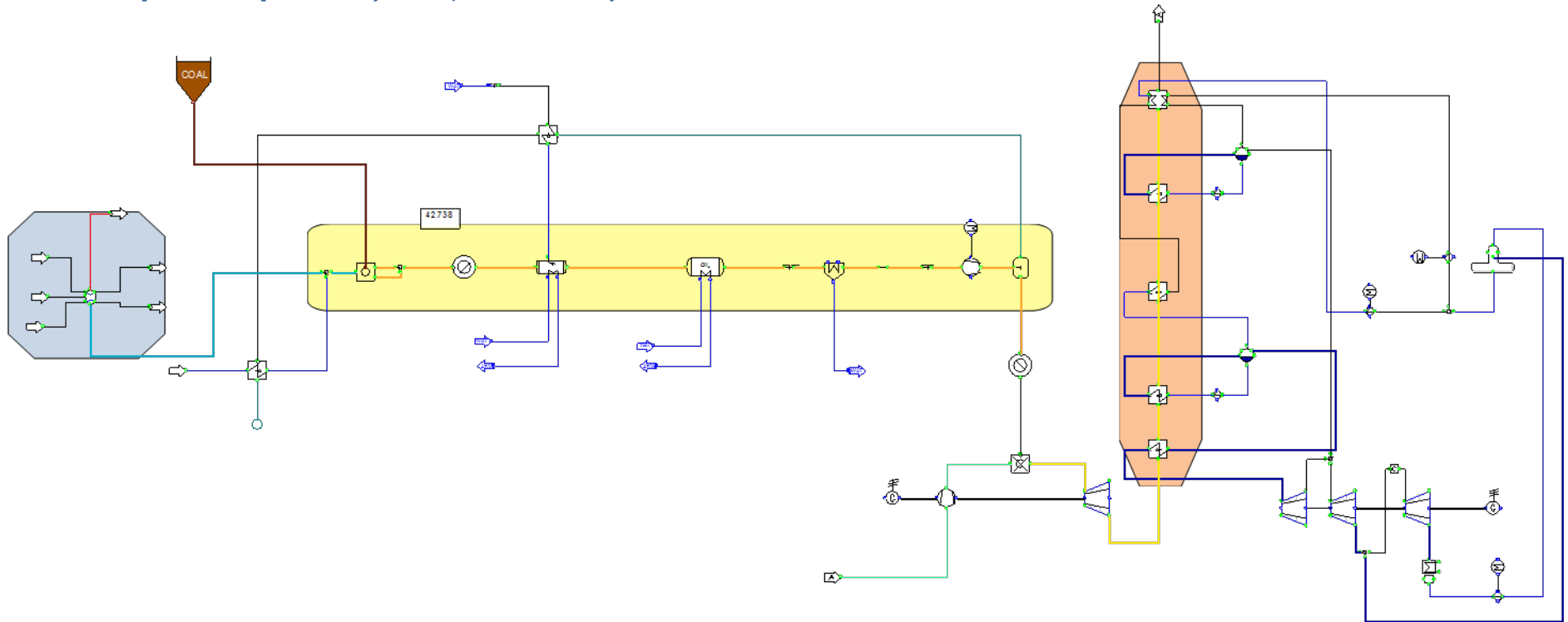
Διάγραμμα 8.1.10. Q-T διάγραμμα για θερμοκρασία υπέρθερμου ατμού 350°C



Διάγραμμα 8.1.11. Q-T διάγραμμα για θερμοκρασία υπέρθεμου ατμού 600°C

Στο Διάγραμμα Q-T του υπέρθεμου ατμού των 350°C η θερμότητα που απάγεται για τη διαδικασία της υπερθέρμανσης του ατμού είναι περισσότερη από αυτή του ατμού των 600°C όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα . Αυτό δικαιολογεί πλήρως τη μείωση των ηλεκτρικών βαθμών απόδοσης, αυξανόμενης της θερμοκρασίας του υπέρθεμου ατμού.

8.2. 2^η περίπτωση κυκλώματος διπλού τυμπάνου



Εικόνα 8.2.1. Σχηματική περιγραφή μονάδας διπλού τυμπάνου

Όπως παρατηρείται, το κύκλωμα μέχρι την παραγωγή του SNG είναι όμοιο με αυτό της περίπτωσης 1.1. Η διαφοροποίησή του υπάρχει στον συνδυασμένο κύκλο. Τα ζεστά καυσαέρια του αεριοστροβίλου, θερμικής ενέργειας 22,7 MW, που εισέρχονται στο Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας αρχικά προσδίδουν μέρος της θερμότητάς τους για την παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (550°C και 120 bar) και στη συνέχεια προσδίδει την υπόλοιπη θερμότητα μέχρι τα 4,4 MW που εξέρχεται από το λέβητα, στο δεύτερο κύκλωμα ατμοπαραγωγής μέσης πίεσης και θερμοκρασίας (10 bar κορεσμένου ατμού).

Η αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια από την εκτόνωση των καυσαερίων στον αεριοστροβίλο είναι 10,5 MW. Η εκτόνωση του ατμού στον ατμοστροβίλο προσδίδει στον άξονά της γεννήτριάς του 5,25 MW ηλεκτρικής ενέργειας ενώ οι ηλεκτρικές απώλειες για τη λειτουργία του αντλιοστασίου ανέρχονται στα 50kW.

Λεπτομερέστερα, ο ατμός ΥΠ εισέρχεται στην είσοδο του ατμοστροβίλου. Όλος αυτός ο ατμός εκτονώνεται μέχρι τη βαθμίδα πίεσης 10 bar. Ο ατμός ΧΠ που παράγεται, είναι κορεσμένος σε πίεση 10 bar και ενώνεται με το ρεύμα του ατμού που εξέρχεται από τη βαθμίδα των 10 bar του ατμοστροβίλου. Στη συνέχεια, ο συνολικός ατμός ΧΠ εκτονώνεται μέχρι τα 1,8 bar. Ένα μέρος του ατμού αυτού εισέρχεται στον απαερωτή ως κορεσμένος ατμός ενώ το υπόλοιπο εκτονώνεται μέχρι τα 0,07 bar όπου και εισέρχεται στο συμπυκνωτή του κυκλώματος. Το συμπύκνωμα εισέρχεται στον απαερωτή ως υπόψυκτο νερό.

Ομοίως, στον Πίνακα 8.2.1. παρουσιάζονται οι τιμές του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου και της συνολικής μονάδας για κάθε τιμή καθαρότητας οξυγόνου που τροφοδοτεί τον αεριοποιητή.

Πίνακας 8.2.1. Τιμές ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και μονάδας για κάθε τιμή καθαρότητας τροφοδοτούμενου οξυγόνου

Καθαρότητα οξυγόνου	Ηλεκτρ.β.α. Συνδ. κύκλου	Ηλεκτρ. β.α. μονάδας
90,0%	49,26%	27,58%
91,0%	49,25%	27,57%
92,0%	49,25%	27,56%
93,0%	49,24%	27,55%
94,0%	49,23%	27,54%
95,0%	49,22%	27,41%
96,0%	49,21%	27,55%
98,0%	49,20%	27,61%
99,7%	49,19%	27,57%

Είναι φανερό και ποσοτικά πλέον ότι η χρήση διπλού τυμπάνου αυξάνει το βαθμό απόδοσης της μονάδας, ενώ ταυτόχρονα τα υπόλοιπα βασικά στοιχεία της μονάδας, όπως σύνθεση καυσίμου, σύνθεση καυσαερίου κ.ο.κ. παραμένουν τα ίδια.

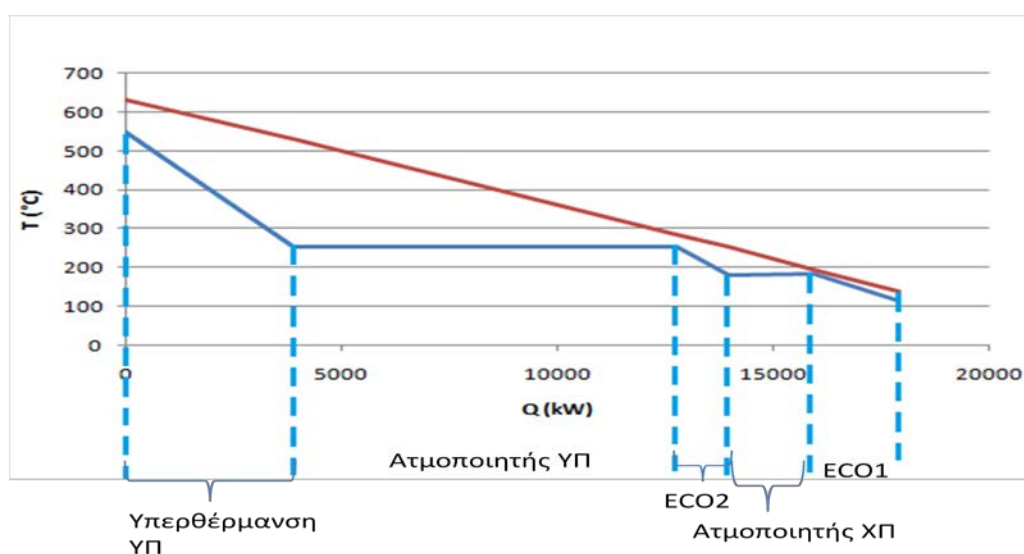
Όπως και στην περίπτωση του κυκλώματος απλού τυμπάνου, γίνεται μια περαιτέρω ανάλυση της λειτουργίας του λέβητα, μέσω των διαγραμμάτων Q – T. Για την λειτουργία της μονάδας, στον αεριοποιητή προσάγεται οξυγόνο καθαρότητας 98%. Αρχικά έγιναν δοκιμές μεταβάλλοντας την πίεση του υπέρθερμου ατμού, διατηρώντας σταθερή την πίεσή του στα 120bar και στη συνέχεια το αντίστροφο, δηλαδή με σταθερή τη θερμοκρασία του στους 550 °C και μεταβλητή την πίεσή του. Και στις δύο περιπτώσεις παρέμεινε σταθερή η πίεση του ατμού στο τμήμα ΧΠ του λέβητα, ίση με 10 bar. Επίσης, σταθερά θεωρήθηκαν και τα pitch points τόσο ΥΠ όσο και ΧΠ. Το pitch point στο τύμπανο ΥΠ τέθηκε στους 35°C ενώ το αντίστοιχο στο τύμπανο ΧΠ στους 15°C.

Ο Πίνακας 8.2.2. παρουσιάζει τη μεβολη των ηλεκτρικών βαθμών απόδοσης τόσο του συνδυασμένου κύκλου όσο και ολόκληρης της μονάδας για μεταβαλλόμενη πίεση υπέρθεμου ατμού.

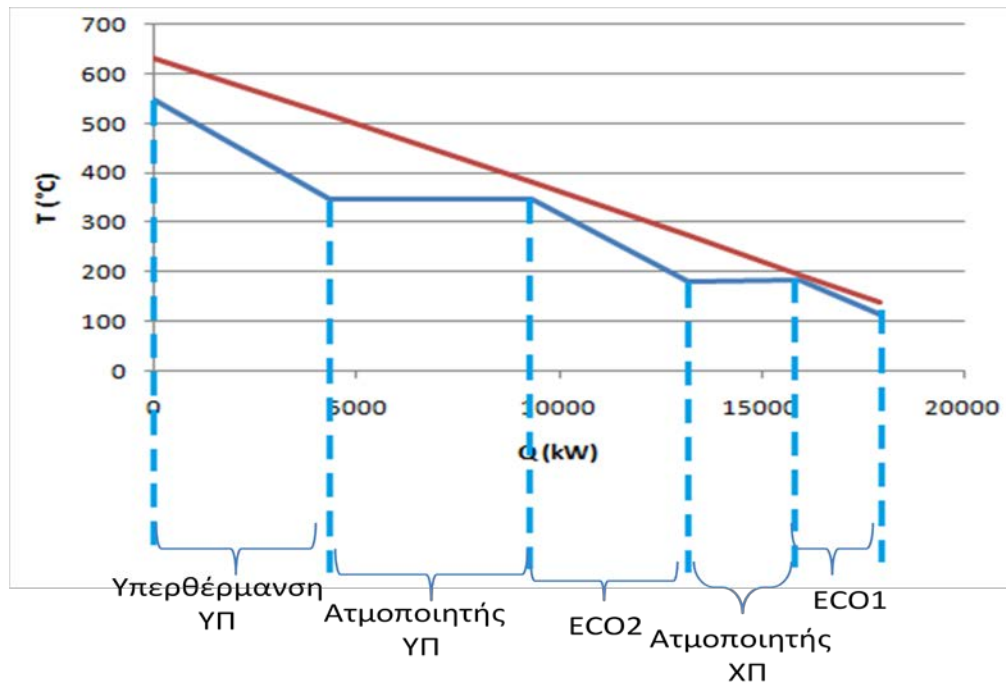
Πίνακας 8.2.2. Ηλεκτρικός β.α. συνδυασμένου κύκλου και μονάδας για διαφορετικές τιμές πίεσης υπέρθεμου ατμού στο ΛΑΘ.

Πίεση ΥΠ ατμού (bar)	Ηλεκτρικός Β.Α. συνδυασμένου κύκλου	Ηλεκτρικός Β.Α. μονάδας
40	48,01%	26,82%
80	48,82%	27,36%
100	49,04%	27,50%
120	49,20%	27,61%
140	49,32%	27,69%
160	49,43%	27,76%

Ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση, αυξανόμενης της πίεσης του ατμού ΥΠ αυξάνονται και οι ηλεκτρικοί βαθμοί απόδοσης. Αυτό μπορεί να διαφανεί και από τα Διαγράμματα 8.2.1. και 8.2.2 στα οποία παρατηρείται ότι για πίεση 40 bar η θερμότητα που απάγεται για την υπερθέρμανση του ατμού είναι πολύ λιγότερη από ότι στην περίπτωση των 160 bar.



Διάγραμμα 2.2.1. Q-T διάγραμμα για παραγωγή υπέρθεμου ατμού (40 bar, 550°C)



Διάγραμμα 2.2.2. Q-T διάγραμμα για παραγωγή υπέρθερμου ατμού 160 bar, 550°C)

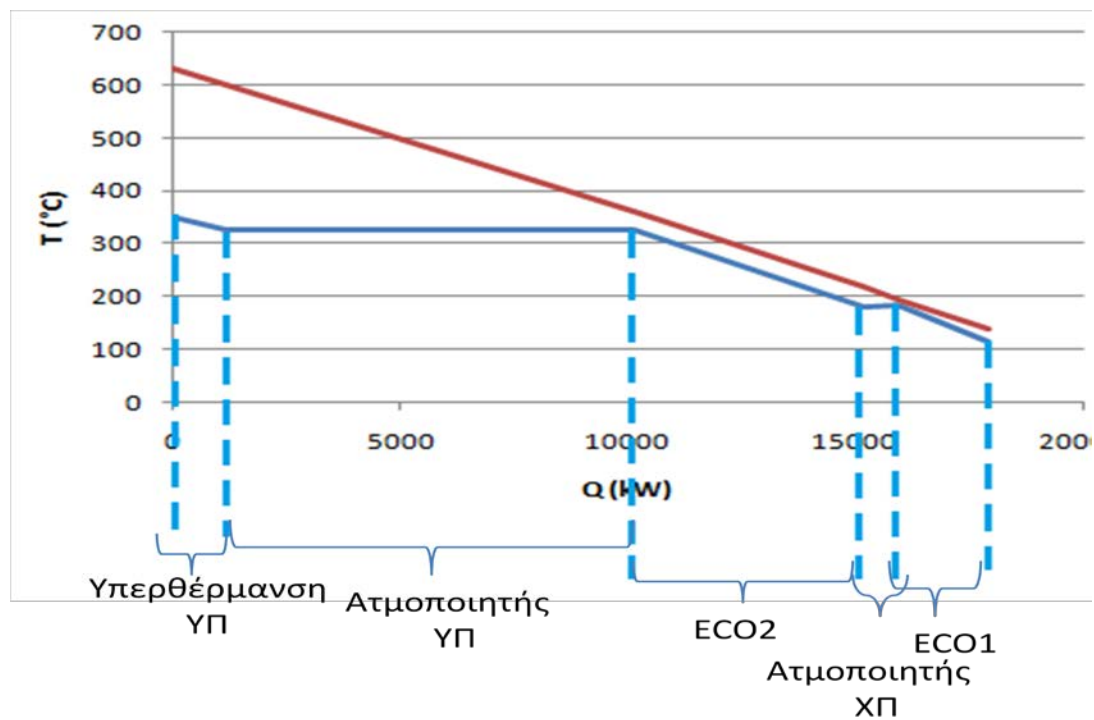
Στη συνέχεια ο Πίνακας 8.2.2. παρουσιάζει τους ηλεκτρικούς βαθμούς απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου και ολόκληρης της μονάδας για κάθε θερμοκρασία του υπέρθερμου ατμού.

Πίνακας 8.2.2. Ηλεκτρικός β.α. συνδυασμένου κύκλου και μονάδας για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας υπέρθερμου ατμού στο ΛΑΘ.

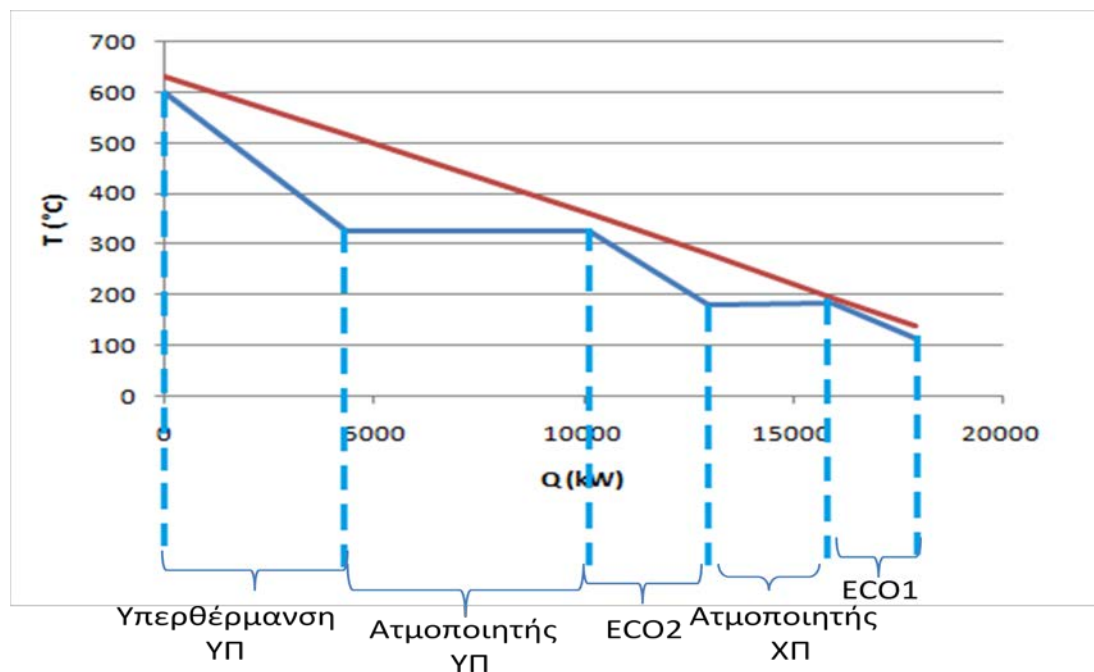
Θερμοκρασία (°C)	Ηλεκτρικός Β.Α. συνδυασμένου κύκλου	Ηλεκτρικός Β.Α. μονάδας
350	48,56%	27,24%
400	48,70%	27,28%
450	48,82%	27,36%
500	48,98%	27,46%
550	49,20%	27,61%
600	49,41%	27,75%

Εδώ παρατηρείται αύξηση του βαθμού απόδοσης με αύξηση της θερμοκρασίας του υπέρθερμου ατμού. Βέβαια, η μεταβολή του βαθμού απόδοσης δεν είναι τόσο ουσιαστική. Πέραν αυτών των θερμοκρασιών, το κύκλωμα δεν μπορεί να λειτουργήσει.

Τα αντίστοιχα διαγράμματα $Q - T$ για 350°C και 550°C αντίστοιχα παρουσιάζονται παρακάτω.

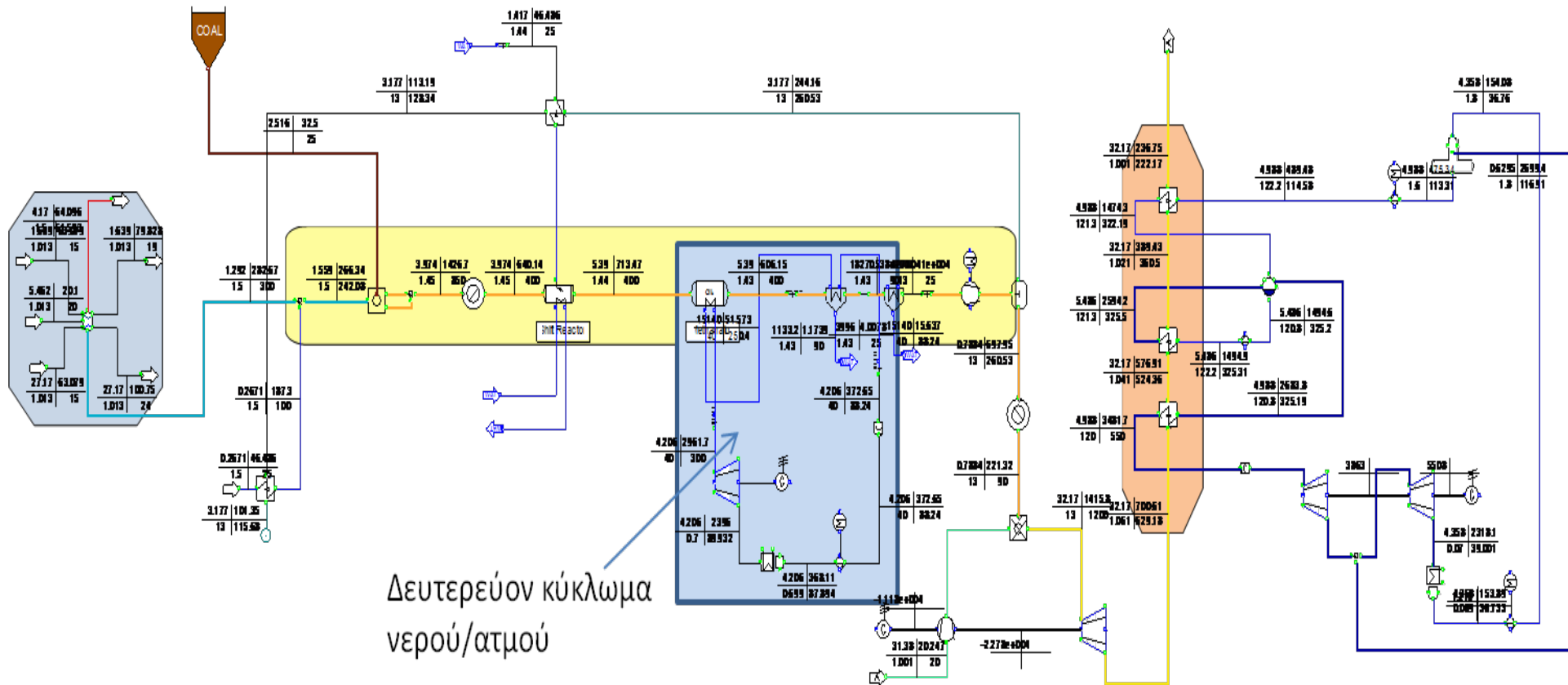


Διάγραμμα 8.2.3. $Q-T$ διάγραμμα για παραγωγή υπέρθερμου ατμού 120 bar , 350°C)



Διάγραμμα 8.2.4. $Q-T$ διάγραμμα για παραγωγή υπέρθερμου ατμού 120 bar , 600°C)

8.3. 3^η Περίπτωση κυκλώματος απλού τυμπάνου



Εικόνα 8.3.1. Σχηματική παράσταση κυκλώματος

Στο προηγούμενο κύκλωμα 8.1. που αναλύθηκε, δεν έγινε καμία αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας που προέρχεται από τον αφυγραντήρα του αερίου μετά τη μεθανοποίηση. Στο παρόν κύκλωμα, η παραγωγή και διαχείριση του αερίου είναι όμοια με αυτή του πρώτου κυκλώματος. Η διαφορά έγκειται στη χρήση του νερού ψύξης του αντιδραστήρα της μεθανοποίησης και του αφυγραντήρα του αερίου. Η αντίδραση μεθανοποίησης είναι έντονα εξώθερμη. Έτσι, λόγω της θερμότητας που εκλύεται από την αντίδραση, το νερό ψύξης του αντιδραστήρα υπερθεμενείται. Ομοίως, η θερμότητα του αερίου που αφαιρείται από ψύξη του στον αφυγραντήρα, προθερμαίνουν το νερό που χρησιμοποιείται γι' αυτό το λόγο. Έτσι επιτυγχάνεται ηλεκτροπαραγωγή μέσα από αυτόν τον ιδιότυπο κύκλο νερού/ατμού.

Λεπτομερέστερα, το νερό αυτό, υψηλής πίεσης 40 bar, εξέρχεται από τον αφυγραντήρα στη διφασική κατάσταση του ατμόνευρο, θερμοκρασίας 250,36°C για την πίεση αυτή. Κατόπιν εισέρχεται στον αντιδραστήρα μεθανοποίησης. Το ατμόνευρο, λόγω της θερμότητας που παράγουν οι αντιδράσεις, ατμοποιείται μέχρι καταστάσεως κορεσμού και στη συνέχεια υπερθεμενείται. Έτσι εξέρχεται από τον αντιδραστήρα με πίεση 40 bar και θερμοκρασία 300°C. Ο υπέρθερμος ατμός εκτονώνεται στον έτερο ατμοστρόβιλο του κυκλώματος αποδίδοντας 2,0 – 2,3 MW ηλεκτρικής ενέργειας. Το ατμόνευρο κατόπιν διέρχεται από το ψυγείο και συμπιέζεται από την τροφοδοτική αντλία μέχρι πίεσης των 40 bar. Το συμπυκνωμένο νερό τροφοδοτεί πλέον τον αφυγραντήρα και έτσι κλείνει ο κύκλος.

Η παροχή του νερού στο κύκλωμα αυτό είναι ίση με 3,8 – 4,3 kg/sec και αυτή καθορίζεται από τις θερμικές απαιτήσεις τόσο του αντιδραστήρα μεθανοποίησης όσο και του αφυγραντήρα. Στο μεν αντιδραστήρα η απαίτησή του έγκειται στη διατήρηση της θερμοκρασίας του αερίου στους 400°C. Στον δε αφυγραντήρα το αέριο ψύχεται στους 90°C. Η ιδιαιτερότητα του κυκλώματος είναι στο ότι ούτε ο μεθανοποιητής ούτε ο αφυγραντήρας είναι αυτοί καθ'αυτοί εναλλάκτες. Ειδικότερα, ο μεθανοποιητής αποδίδει μέσω των χημικών αντιδράσεων θερμότητα, γι' αυτό και το αέριο, μέσω του νερού ψύξης,

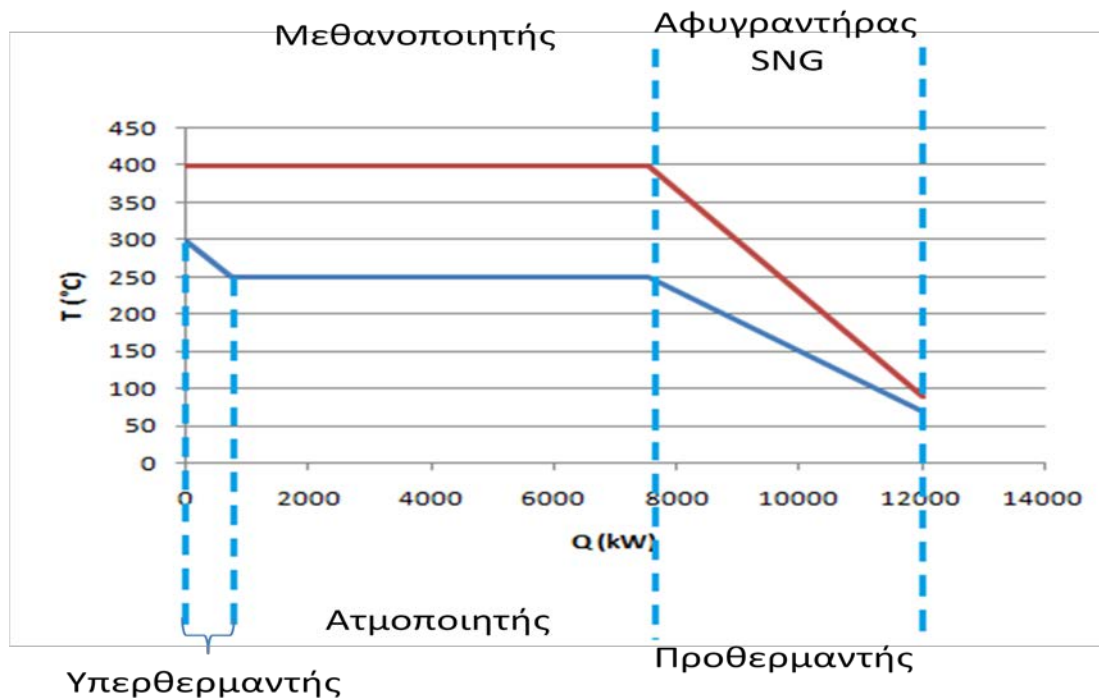
διατηρεί τη θερμοκρασία του στην έξοδό του από τον αντιδραστήρα στους 400°C. Το αέριο, στη συνέχεια, υφίσταται δεύτερη ψύξη και αφύγρανση του απομείναντος νερού και τελικώς το αέριο εξέρχεται με θερμοκρασία 25°C. Η περαιτέρω ψύξη μειώνει την ενεργειακή κατανάλωση για τη συμπίεση που ακολουθεί και η αφύγρανση αφαιρεί το απομένον νερό με αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού του μεθανίου στο αέριο.

Η μετατροπή αυτή του κυκλώματος και η εκμετάλλευση της απαγόμενης θερμότητας του αερίου μέσα από τον αντιδραστήρα του μεθανίου και του αφυγραντήρα, αυξάνει το βαθμό απόδοσης της μονάδας κατά 5,2 % κατά μέσο όρο των κυκλωμάτων διαφορετικής καθαρότητας εισερχόμενου οξυγόνου. Ο πίνακας 8.3.1 καταγράφει τους ηλεκτρικούς βαθμούς απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου και της συνολικής μονάδας για κάθε τιμή καθαρότητας οξυγόνου που τροφοδοτεί τον αεριοποιητή.

Πίνακας 8.3.1. Ηλεκτρικοί βαθμοί απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και συνολικής μονάδας για διαφορετικές τιμές καθαρότητας οξυγόνου

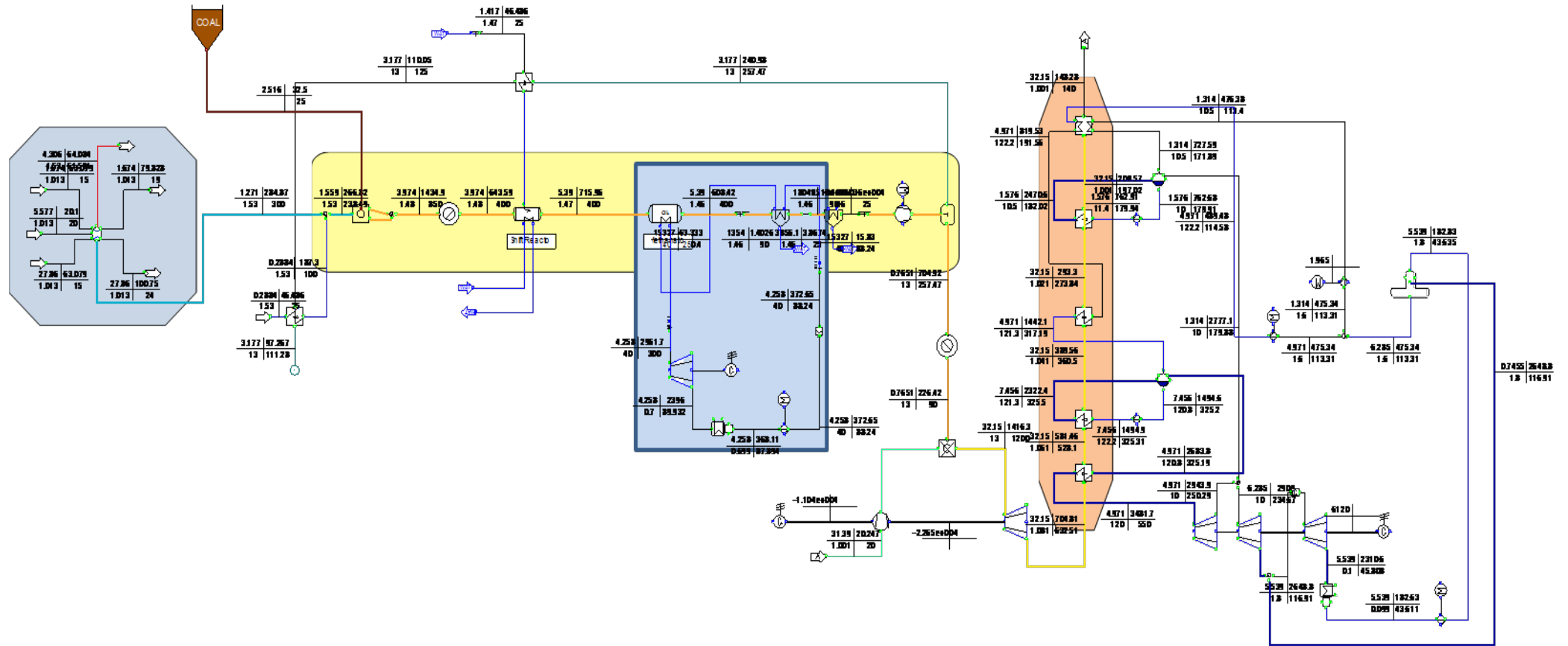
Καθαρότητα οξυγόνου	Ηλεκτρ. β.α. συνδ. κύκλου	Ηλεκτρ. β.α. μονάδας
90,0%	47,83%	30,58%
91,0%	47,83%	30,63%
92,0%	47,82%	30,65%
93,0%	47,81%	30,69%
94,0%	47,81%	30,71%
95,0%	47,80%	30,73%
96,0%	47,79%	30,86%
98,0%	47,77%	31,09%
99,7%	47,76%	31,11%

Το διάγραμμα Q-T για το δευτερεύον κύκλωμα νερού/ατμού παρουσιάζεται στο διάγραμμα 8.3.1.:



Διάγραμμα 8.3.1. Q-T διάγραμμα για το δευτερεύον κύκλωμα νερού/ατμού

8.4. 4^η Περίπτωση κυκλώματος διπλού τυμπάνου



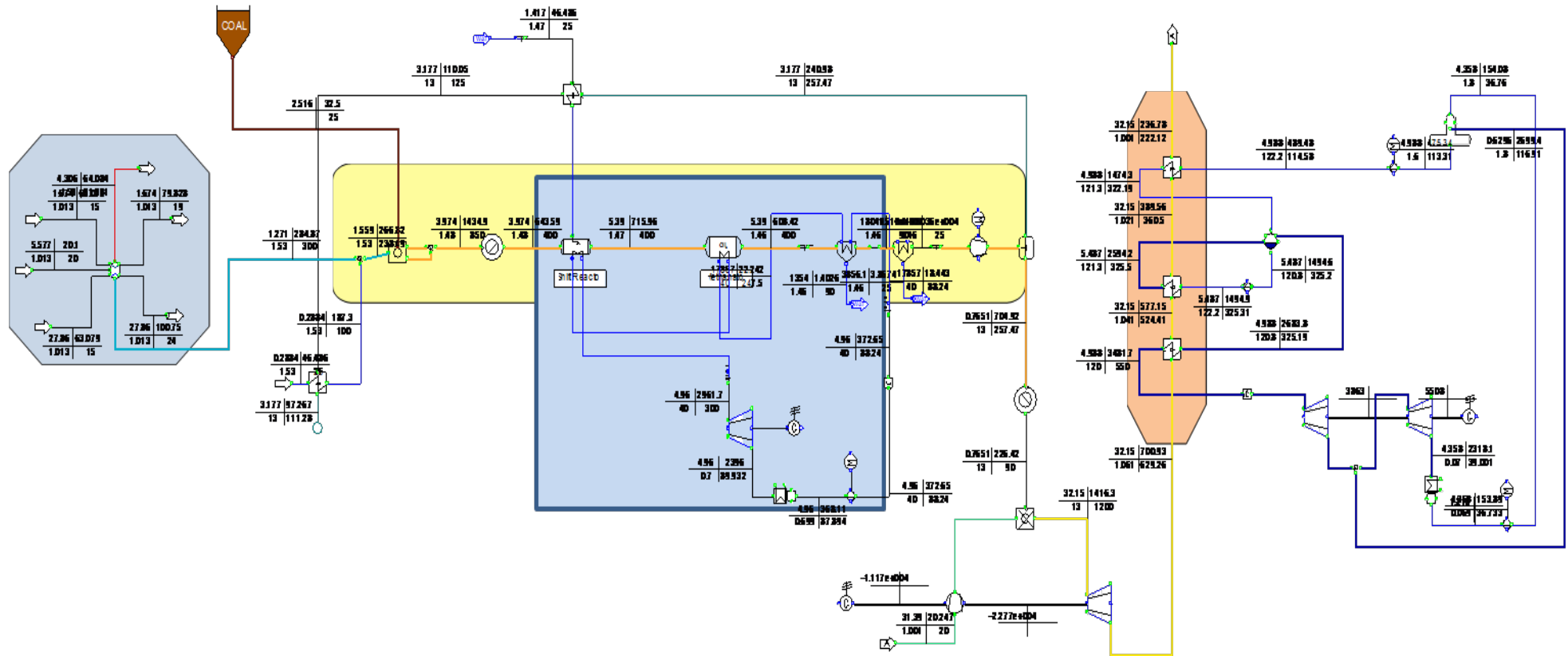
Εικόνα 8.4.1. Σχηματική περιγραφή μονάδας με ανάκτηση θερμότητας από το αέριο και το καυσάεριο (λέβητας διπλού τυμπάνου)

Η μονάδα αυτή διαφοροποιείται από την προηγούμενη της περίπτωσης 8.3. ως προς τον κύκλο νερού/ατμού στο Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας. Ο λέβητας είναι ίδιος με αυτόν της μονάδας της περίπτωσης 1.2. Η θερμότητα των καυσαερίων χρησιμοποιείται για παραγωγή υπέρθερμου ατμού 550°C και 120 bar και κορεσμένου ατμού 10 bar. Η μετατροπή αυτή του λέβητα καθώς και το δευτερεύον κύκλωμα νερού/ατμού αποφέρουν αύξηση στην ηλεκτροπαραγωγή και κατ' επέκταση και αύξηση του βαθμού απόδοσης. Ο βαθμός απόδοσης της μονάδας κατά μέσο όρο των περιπτώσεων καθαρότητας τροφοδοτούμενου οξυγόνου είναι **32,3%** . Ο αντίστοιχος πίνακας των ηλεκτρικών βαθμών απόδοσης είναι ο Πίνακας.

Πίνακας 8.4.1. Τιμές ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και μονάδας για κάθε τιμή καθαρότητας τροφοδοτούμενου οξυγόνου

Καθαρότητα Οξυγόνου	Ηλεκτρ. β.α. συνδ. κύκλου	Ηλεκτρ. β.α. μονάδας
90,0%	49,26%	31,52%
91,0%	49,25%	31,58%
92,0%	49,25%	31,59%
93,0%	49,24%	31,64%
94,0%	49,23%	31,65%
95,0%	49,22%	31,67%
96,0%	49,21%	31,81%
98,0%	49,20%	32,03%
99,7%	49,19%	32,05%

8.5. 5^η Περίπτωση κυκλώματος (απλού τυμπάνου)



Εικόνα 8.5.1 Σχηματική παράσταση κυκλώματος μονάδας

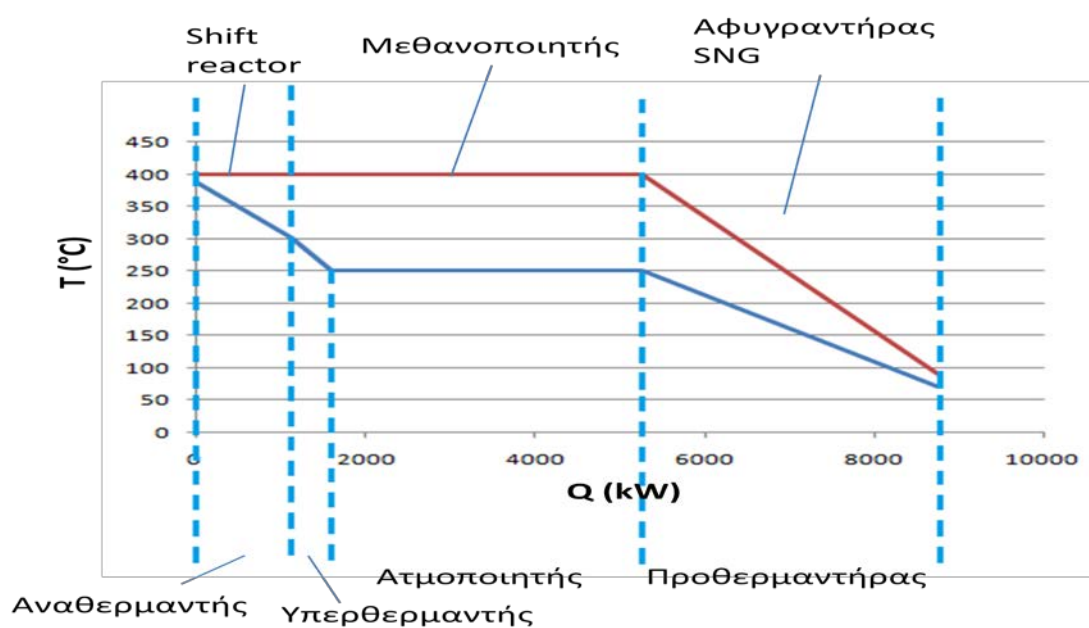
Στο προηγούμενο κύκλωμα της περίπτωσης 8.3. έγινε εκμετάλλευση της θερμότητας του αντιδραστήρα μεθανοποίησης και του αφυγραντήρα, του συστήματος παραγωγής SNG. Στο κύκλωμα 8.4. προστίθεται άλλο ένα στοιχείο, αυτό του αντιδραστήρα μετατόπισης. Το κύκλωμα αυτό είναι παρόμοιο με το προηγούμενο μέχρι την έξοδο του υπέρθερμου νερού από τον αντιδραστήρα μεθανοποίησης. Ο υπέρθερμος ατμός των 40 bar και 300°C, όπως και προηγουμένως, εκτονώνεται στον δευτερεύοντα αμμοστρόβιλο της μονάδας, όχι όμως πλήρως, αλλά μέχρι πίεσεως των 20bar. Εκεί υφίσταται αναθέρμανση διερχόμενος από τον αντιδραστήρα μετατόπισης. Λόγω των χημικών αντιδράσεων μέσα στον αντιδραστήρα, παράγεται θερμότητα η οποία απάγεται στο διερχόμενο υπέρθερμο ατμό ώστε να διατηρηθεί η θερμοκρασία του αερίου στους 400°C. Έτσι, ο υπέρθερμος ατμός αναθερμάνεται μέχρι θερμοκρασίας 384°C περίπου και εκτονώνεται πλήρως στις επόμενες βαθμίδες του στροβίλου. Ύστερα, το ατμόνερο διέρχεται από το ψυγείο και συμπυκνώνεται πριν τροφοδοτήσει την αντλία, κλείνοντας ομοιοτρόπως το θερμοδυναμικό κύκλο.

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του κυκλώματος με την αναθέρμανση μέσω του αντιδραστήρα μετατόπισης, ανέρχεται στα 1,75-1,91 MW. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και μονάδας παρουσιάζεται στον Πίνακα. για διαφορετικές τιμές καθαρότητας οξυγόνου που τροφοδοτείται στον αεριοποιητή.

Πίνακας 8.5.1 Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και συνολικής μονάδας για διαφορετικές καθαρότητες οξυγόνου στον αεριοποιητή

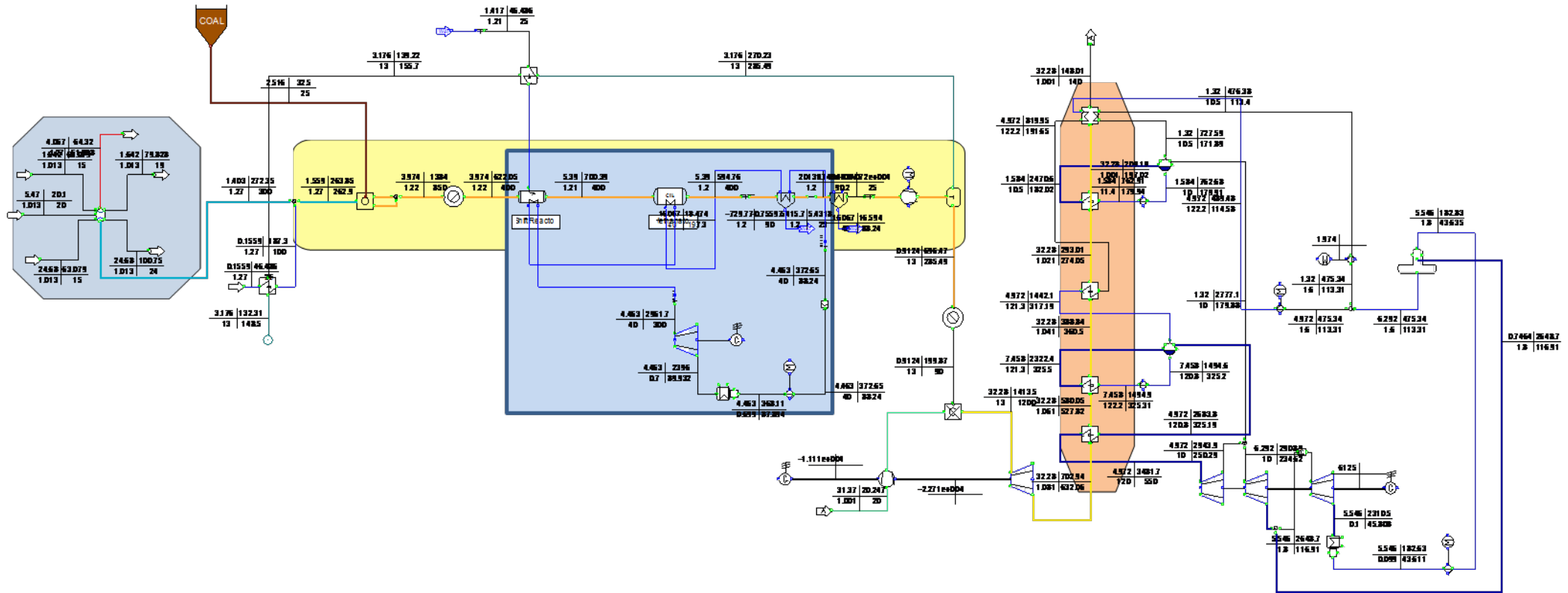
Καθαρότητα	Ηλ.β.α. συνδυασμένου κύκλου	Ηλ. β.α. μονάδας
90,0%	47,83%	31,32%
91,0%	47,83%	31,38%
92,0%	47,82%	31,39%
93,0%	47,81%	31,44%
94,0%	47,81%	31,45%
95,0%	47,80%	31,47%
96,0%	47,79%	31,60%
98,0%	47,77%	31,83%
99,7%	47,76%	31,85%

Στο διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του αερίου και του νερού με την συναλλασσόμενη ενέργεια, περιγράφοντας σχηματικά τον κύκλο του δευτερεύοντος κυκλώματος νερού/ατμού



Διάγραμμα 8.5.1. Διάγραμμα Q-T δευτερεύοντος κυκλώματος νερού ατμού

8.6. 6^η Περίπτωση κυκλώματος διπλού τυμπάνου



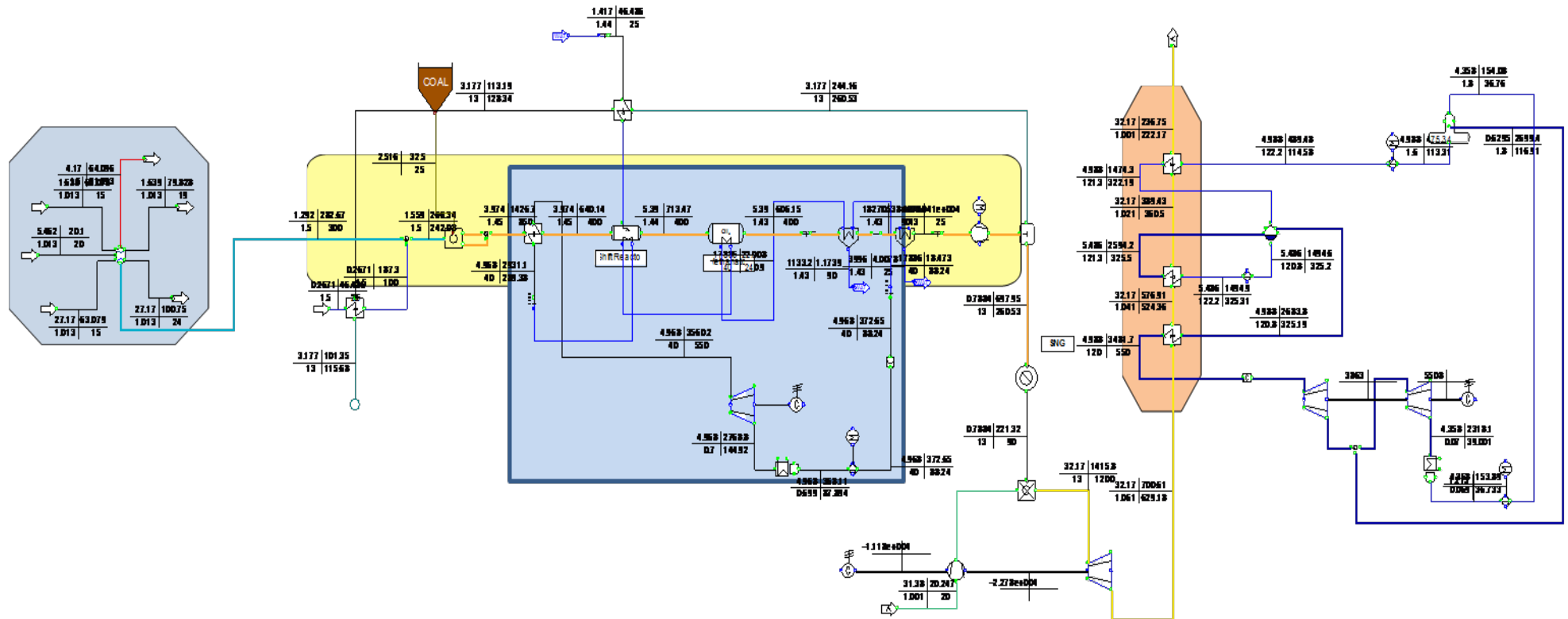
Εικόνα 8.6.1. Σχηματική περιγραφή μονάδας

Η μονάδα είναι ίδια με αυτή είναι ίδια με αυτή της παραγράφου 3.1 με τη διαφορά ότι ο λέβητας ανάκτησης θερμότητας είναι διπλού τυμπάνου. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου και ολόκληρης της μονάδας ανάλογα με την καθαρότητα του τροφοδοτούμενου οξυγόνου στον αεριοποιητή παρουσιάζεται στον Πίνακα.

Πίνακας 8.6.1 Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και συνολικής μονάδας για διαφορετικές καθαρότητες οξυγόνου στον αεριοποιητή

Καθαρότητα οξυγόνου	Ηλ. β.α. συνδυασμένου κύκλου	Ηλ. β.α. μονάδας
90,0%	49,26%	32,27%
91,0%	49,25%	32,32%
92,0%	49,25%	32,34%
93,0%	49,24%	32,38%
94,0%	49,23%	32,40%
95,0%	49,22%	32,42%
96,0%	49,21%	32,55%
98,0%	49,20%	32,77%
99,7%	49,19%	32,79%

8.7. 7^η Περίπτωση κυκλώματος απλού τυμπάνου



Εικόνα 8.7.1 Σχηματική απεικόνιση μονάδας.

Το κύκλωμα αυτό είναι η συνέχεια του προηγούμενου, με τη διαφορά ότι εδώ το στοιχείο απορρόφησης θερμότητας του αερίου, ώστε αυτό να ψυχθεί από τους 850°C στους 400°C, αντικαθίσταται από έναν εναλλάκτη θερμότητας και έτσι αυτή η θερμοτητα γίνεται πλήρως εκμεταλλεύσιμη από το κύκλωμα νερού-ατμού.

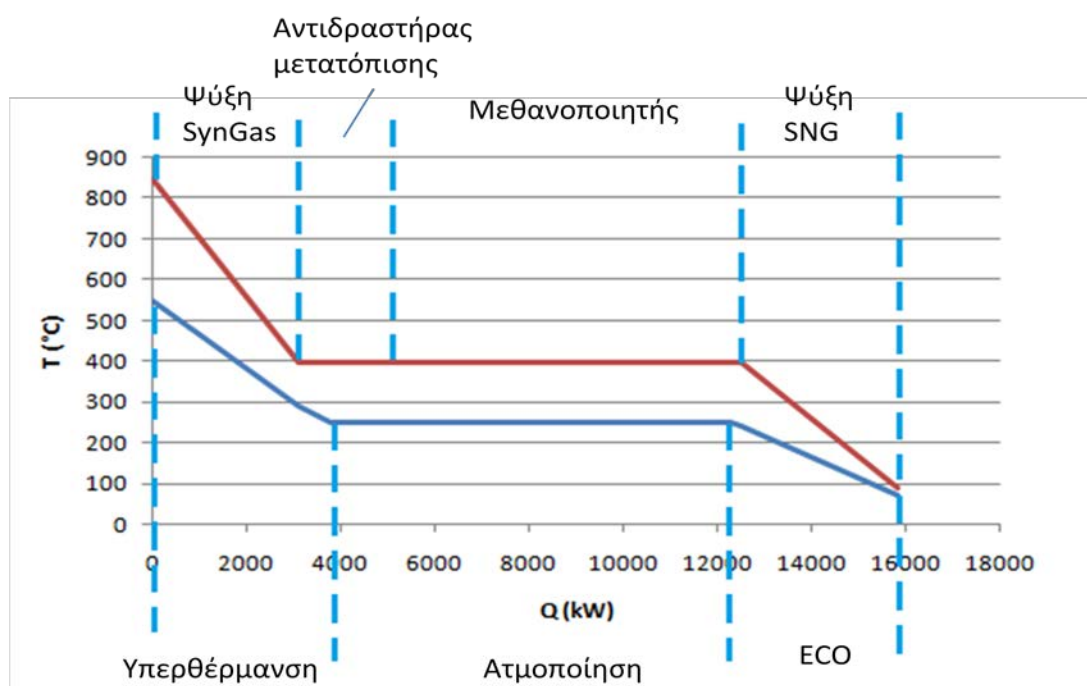
Όπως και στα προηγούμενα κυκλώματα, το υπόψυκτο νερό από την τροφοδοτική αντλία συμπιέζεται μέχρι τα 40bar, διέρχεται στον αφυγραντήρα, όπου και προθερμίνεται. Η διαφορά με πριν είναι ότι εξέρχεται από αυτόν σε κατάσταση υπόψυκτη. Κατόπιν, το νερό εισέρχεται στον αντιδραστήρα μεθανοποίησης όπου και ατμοποιείται μερικώς. Εξερχόμενο πλέον το ατμόνερο, εισέρχεται στον αντιδραστήρα μετατόπισης όπου και ατμοποιείται πλήρως. Τέλος ο κορεσμένος πλέον ατμός διέρχεται από το σύστημα ψύξης του αερίου SynGas και η συναλλαγή της θερμότητας που υπεισέρχεται υπερθερμαίνει πλέον τον ατμό. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του αερίου (850°C) ο υπέρθερμος ατμός θερμοδυναμικά δύναται να φτάσει σε θερμοκρασία 550°C - 600°C. Έτσι για το κύκλωμα αυτής της μονάδας, ο υπέρθερμος ατμός έχει θερμοκρασία 550°C, εν αντιθέσει με τις υπόλοιπες περιπτώσεις στις οποίες ο ατμός έφτανε τους 300°C λόγω του περιορισμού των 400°C του αερίου. Ο υπέρθερμος ατμός εκτονώνεται στον αμοστρόβιλο παράγοντας 3,5 MW_{el}.

Ο πίνακας 8.7.1 παρουσιάζει τους ηλεκτρικούς βαθμούς απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και συνολικά της μονάδας για κάθε τιμή καθαρότητας τροφοδοτούμενου οξυγόνου.

Πίνακας 8.7.1. Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και συνολικά της μονάδας για καθαρότητα οξυγόνου που τροφοδοτεί τον ατμοποιητή

Καθαρότητα οξυγόνου	Ηλ. β.α. συνδυασμένου κύκλου	Ηλ. β.α. μονάδας
90,0%	47,83%	33,18%
91,0%	47,83%	33,23%
92,0%	47,82%	33,26%
93,0%	47,81%	33,31%
94,0%	47,81%	33,33%
95,0%	47,80%	33,35%
96,0%	47,79%	33,48%
98,0%	47,77%	33,70%
99,7%	47,76%	33,73%

Το διάγραμμα 8.7.1. παρουσιάζει παράλληλα τις τιμές της θερμοκρασίας του αερίου και του νερού για την συναλλασσόμενη θερμική ενέργεια που απαιτείται, στην περίπτωση που η μονάδα λειτουργεί με καθαρότητα τροφοδοτούμενου οξυγόνου 98%.



Διάγραμμα 8.7.1. Q-T διάγραμμα για το δευτερεύον κύκλωμα νερού/ατμού.

Λόγω της διαφοροποίησης του κυκλώματος στην παροχή του νερού στον αντιδραστήρα μετατόπισης, η σύσταση του παραγόμενου SNG καθώς φυσικά και του καυσαερίου μεταβάλλεται. Κατόπιν τούτου παρατίθενται οι πίνακες με την κατά μάζα σύσταση του SNG και του καυσαερίου αντίστοιχα.

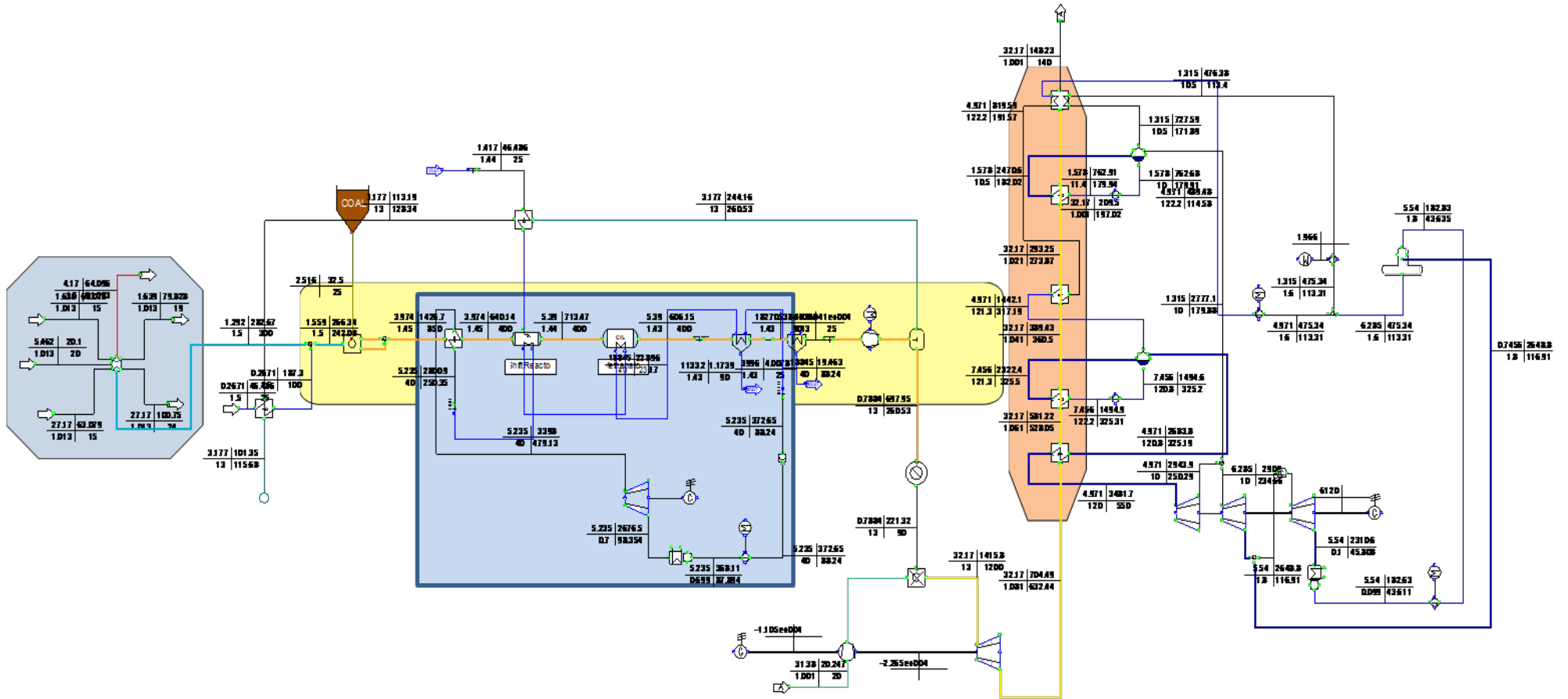
Πίνακας 8.7.1. Κατ'όγκο σύσταση παραγόμενου καύσιμου SNG για διαφορετικά ποσοστά καθαρότητας οξυγόνου

Purity	90%	91%	92%	93%	94%	95%	96%	98%	99,70%
AR	5,79%	5,20%	4,60%	4,01%	3,43%	2,85%	2,28%	1,14%	0,17%
CH₄	59,70%	60,16%	60,53%	60,98%	61,34%	61,79%	62,51%	63,90%	64,61%
CO	2,16%	2,15%	2,14%	2,13%	2,13%	2,12%	2,09%	2,04%	2,03%
CO₂	2,43%	2,45%	2,46%	2,48%	2,50%	2,51%	2,54%	2,59%	2,62%
H₂	25,47%	25,62%	25,83%	25,96%	26,17%	26,29%	26,22%	26,09%	26,33%
H₂O	3,11%	3,07%	3,06%	3,02%	3,01%	2,97%	2,88%	2,71%	2,67%
H₂S	0,89%	0,90%	0,90%	0,91%	0,91%	0,92%	0,93%	0,95%	0,96%
N₂	0,45%	0,46%	0,48%	0,50%	0,52%	0,54%	0,57%	0,59%	0,62%

Πίνακας 8.7.2. Κατ'όγκο σύσταση καυσαερίου

Purity	90%	91%	92%	93%	94%	95%	96%	98%	99,70%
AR	1,22%	1,19%	1,16%	1,12%	1,09%	1,06%	1,03%	0,97%	0,93%
CO₂	3,42%	3,42%	3,42%	3,42%	3,42%	3,42%	3,42%	3,43%	3,43%
H₂O	9,23%	9,23%	9,23%	9,23%	9,23%	9,23%	9,22%	9,20%	9,20%
N₂	73,51%	73,54%	73,57%	73,60%	73,62%	73,65%	73,68%	73,74%	73,78%
O₂	12,59%	12,60%	12,60%	12,61%	12,62%	12,62%	12,63%	12,64%	12,65%

8.8. 8^η Περίπτωση κυκλώματος διπλού τυμπάνου



Εικόνα 8.8.1. Σχηματική απεικόνιση της μονάδας διπλού τυμπάνου.

Η μονάδα αυτή είναι ίδια στη δομή της με την προηγούμενη της περίπτωσης 8.6. Ο λέβητας ανάκτησης θερμότητας, όμως, είναι διπλού τυμπάνου, ένα υψηλής πίεσης 120bar και ένα χαμηλής πίεσης των 10bar. Ο πίνακας 8.8.1 παρουσιάζει τους ηλεκτρικούς βαθμούς απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου και της μονάδας γι'αυτή την περίπτωση του κυκλώματος.

Πίνακας 8.8.1. Ηλεκτρικοί βαθμοί απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και μονάδας για κάθε τιμή καθαρότητας τροφοδοτούμενου οξυγόνου.

Καθαρότητα οξυγόνου	Ηλ.β.α. υνδυασμένου κύκλου	Ηλ. β.α. μονάδας
90,0%	49,26%	34,12%
91,0%	49,25%	34,18%
92,0%	49,25%	34,20%
93,0%	49,24%	34,25%
94,0%	49,23%	34,27%
95,0%	49,22%	34,29%
96,0%	49,21%	34,42%
98,0%	49,20%	34,65%
99,7%	49,19%	34,67%

8.9 Σύνοψη κυκλωμάτων αεριοποίησης λιγνίτη με οξυγόνο

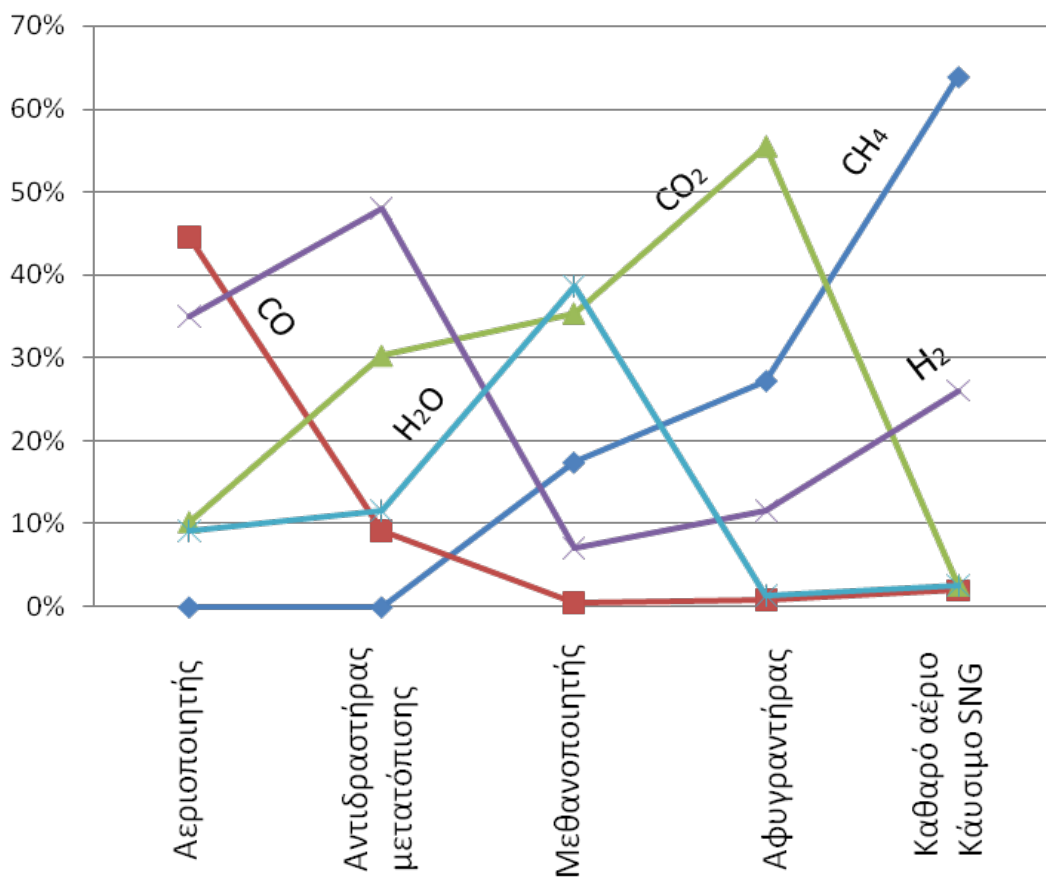
Ο Πίνακας 8.9.1. συνοψίζει τα δεδομένα που τέθηκαν στα διάφορα στοιχεία του κυκλώματος

Πίνακας 8.9.1. Κύριες παράμετροι λειτουργίας μονάδων ηλεκτροπαραγωγής

Θερμοκρασία τροφοδοτούμενου οξυγόνου	300 °C
Θερμοκρασία προστιθέμενου υδρατμού	100 °C
Στοιχειομετρικός λόγος αεριοποίησης	0,4
Θερμοκρασία προστιθέμενου νερού στον αντιδραστήρα μετατόπισης	180 °C
Θερμοκρασία αεριοποίησης	850 °C
Θερμοκρασία μεθανοποίησης	400 °C
Ισεντροπικός β.α. Αεριοσυμπιεστή	0,75
Θερμοκρασία εισόδου SNG στον ΘΚ	90 °C
Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων από τον ΘΚ	1200 °C
Ισεντροπικός β.α. αεριοστροβίλου	0,87
Στοιχεία ατμού ΥΠ	120 bar , 550 °C
Στοιχεία ατμού ΧΠ	10bar, κορεσμένος
Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων από τον ΛΑΘ διπλού τυμπάνου	140 °C

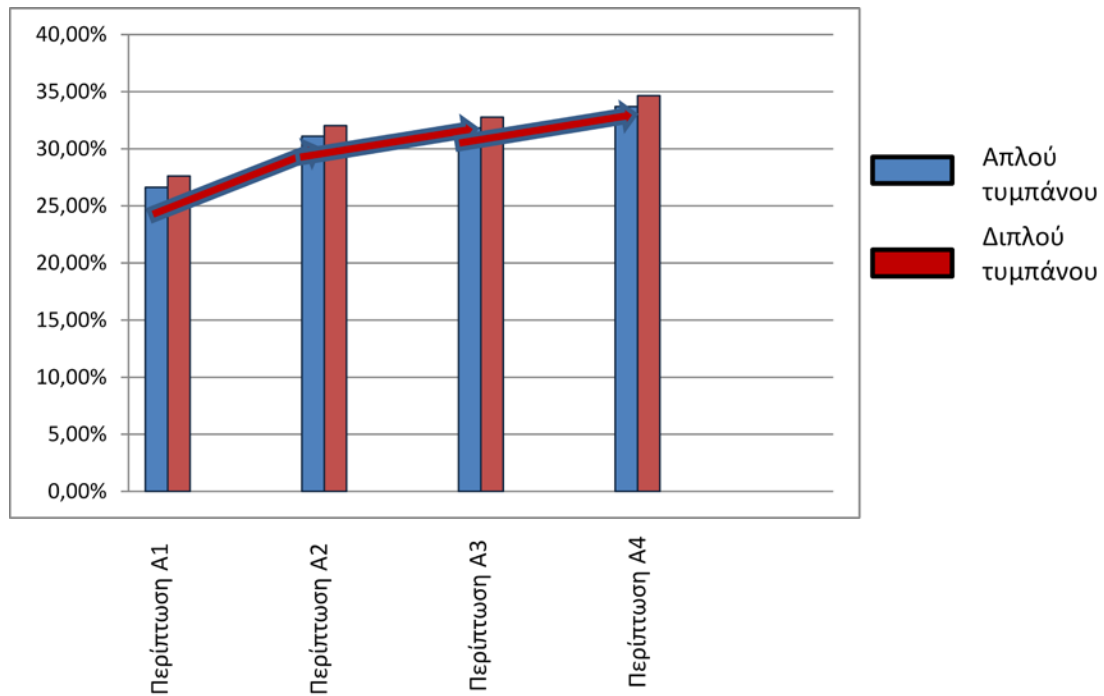
Μείζονος σημασίας για τη μελέτη της συγκεκριμένης τεχνολογίας έχει η πορεία/μεταβολή της περιεκτικότητας του μεθανίου, κατά μήκος της επεξεργασίας του παραγόμενου αερίου, αφού τελικά το τελικό προϊόν είναι το SNG.

Το παρακάτω διάγραμμα 8.9.2. εμφανίζει τη διακύμανση της κατά μάζα περιεκτικότητας του μεθανίου, του μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα και του νερού στα διάφορα στάδια της επεξεργασίας του συνθετικού αερίου μέχρι την τελική παραγωγή του SNG. Η καθαρότητα του τροφοδοτούμενου οξυγόνου για τα αποτελέσματα τέθηκε ίση με 98%.



Διάγραμμα 8.9.2. Μεταβολή της κατά μάζα σύστασης των κυριότερων στοιχείων του αερίου κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του.

Τέλος στο παρακάτω διάγραμμα 8.9.3 απεικονίζεται η μεταβολή του βαθμού απόδοσης της μονάδας, για κάθε περίπτωση κυκλώματος (απλού και διπλού τυμπάνου) για τροφοδοσία οξυγόνου καθαρότητας 98%.



Διάγραμμα 8.9.3. Μεταβολή ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης

Από το διάγραμμα παρατηρείται αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης της μονάδας κατά τη σταδιακή εκμετάλλευση της θερμότητας του παραγόμενου αερίου από τους αντιδραστήρες παραγωγής και επεξεργασίας του. Η αύξηση αυτή μάλιστα μπορεί να φτάσει περίπου στο 8% από το κύκλωμα χωρίς καμία θερμική εκμετάλλευση για ηλεκτροπαραγωγή μέχρι το κύκλωμα με τη μέγιστη δυνατή θερμική εκμετάλλευση.

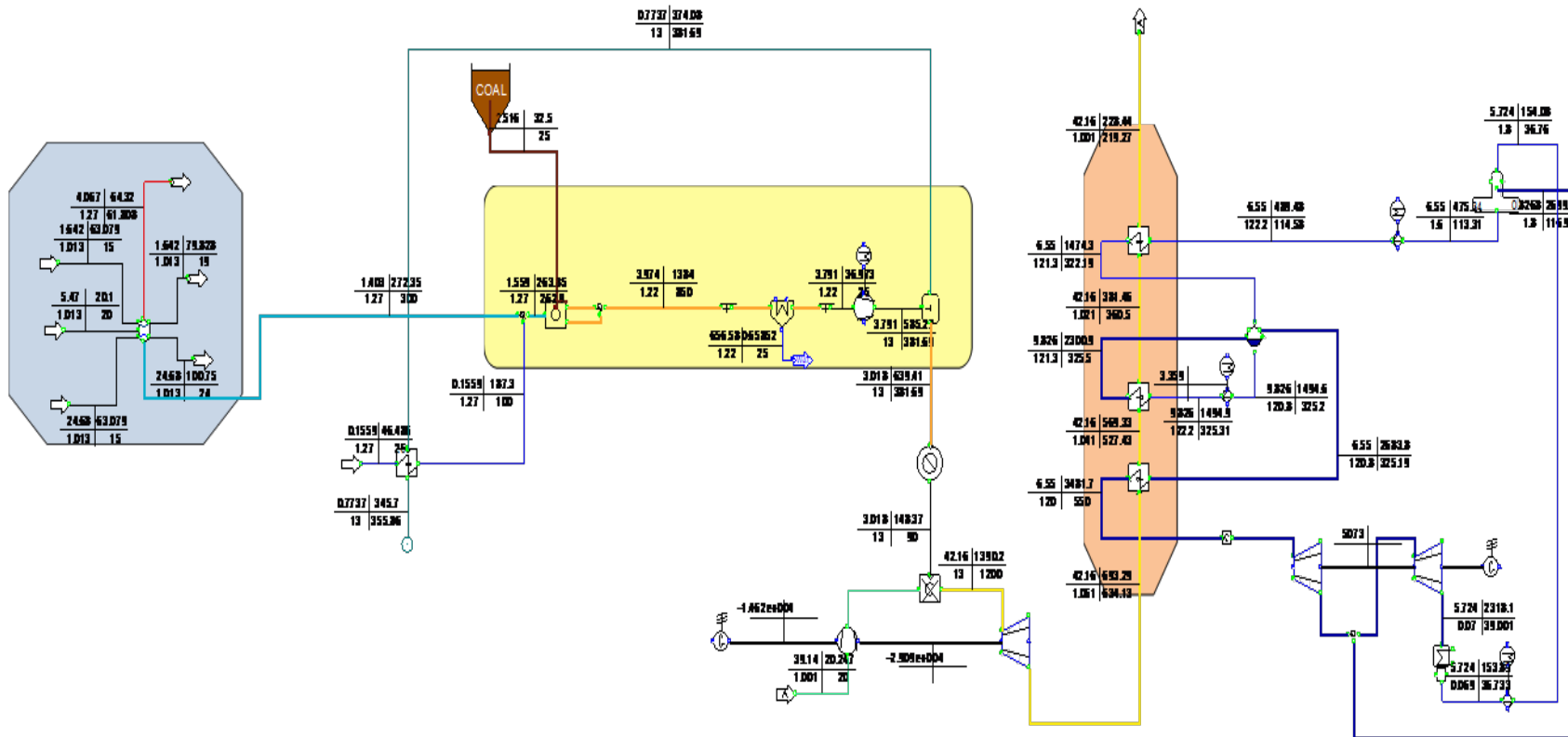
Κεφάλαιο 9. Προσομοίωση ηλ/κών μονάδων χωρίς μεθανοποίηση

Στο κεφάλαιο αυτό μελετούνται ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες με απ' ευθείας καύση του συνθετικού αερίου (SynGas) που παράγεται κατά την αεριοποίηση του γαιάνθρακα, χωρίς προσθήκη συστήματος μεθανοποίησης..

Η βασική δομή των κυκλωμάτων αυτών αποτελείται από τη μονάδα διαχωρισμού του αέρα, τον αεριοποιητή του γαιάνθρακα, τον αφυγραντήρα, το συμπιεστή του συνθετικού αερίου, το διαχωριστή του διοξειδίου του άνθρακα και τη μονάδα του συνδυασμένου κύκλου.

Όμοια με τις περιπτώσεις της Κατηγορίας Α, παρουσιάζονται περιπτώσεις κυκλωμάτων ανάλογα με την θερμική εκμετάλλευση του παραγόμενου συνθετικού αερίου, με στόχο την περαιτέρω αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης της μονάδας.

9.1 1^η Περίπτωση κυκλώματος (απλού τυμπάνου)



Εικόνα 9.1.1. Σχηματική παράσταση κυκλώματος

Συνοπτική περιγραφή της μονάδας

Η μονάδα αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- Μονάδα διαχωρισμού του αέρα (ASU)
- Αεριοποιητής με καθαρό οξυγόνο (Oxy Gasifier)
- Αφυγραντήρας (Water Remover)
- Αεροσυμπιεστής (Compressor)
- Διαχωριστής διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ Separator)
- Αεριοστρόβιλος (Gas Turbine)
- Λέβητας Ανάκτησης Θερμότητας#1 (HRSG#1)
- Στοιχείο απορρόφησης θερμότητας (Heat Sink 1)

Το κύκλωμα αυτό είναι το απλούστερο από τη σειρά κυκλωμάτων της Κατηγορίας Β. Ο αέρας εισέρχεται στη μονάδα διαχωρισμού του αέρα και διά αυτής παράγεται καθαρό οξυγόνο ανάλογης επιθυμητής καθαρότητας. Το ρεύμα οξυγόνου αναμειγνύεται με 1,3 kg/sec υδρατμού θερμοκρασίας 100°C και τροφοδοτεί τον αεριοποιητή. Το καύσιμο αεριοποίησης είναι γαιάνθρακας της παρακάτω σύστασης:

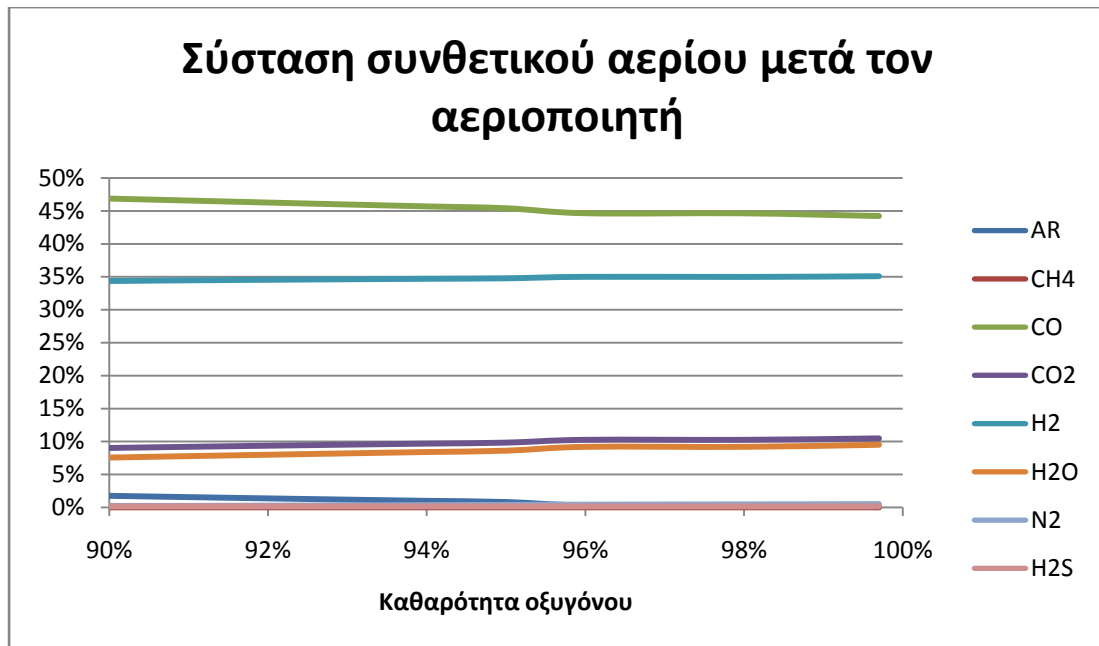
- C : 53,6 % w/w
- H : 3,9 % w/w
- N : 0,6 % w/w
- O : 19,2 % w/w
- S : 0,35 % w/w
- Υγρασία : 18,85 % w/w
- Τέφρα : 3,5 % w/w

Ο γαιάνθρακας αεριοποιείται στους 850°C και το παραγόμενο συνθετικό αέριο έχει τη σύσταση που παρουσιάζεται στον Πίνακα 9.1.1., συναρτήσεως της καθαρότητας του παραγόμενου οξυγόνου από την ASU.

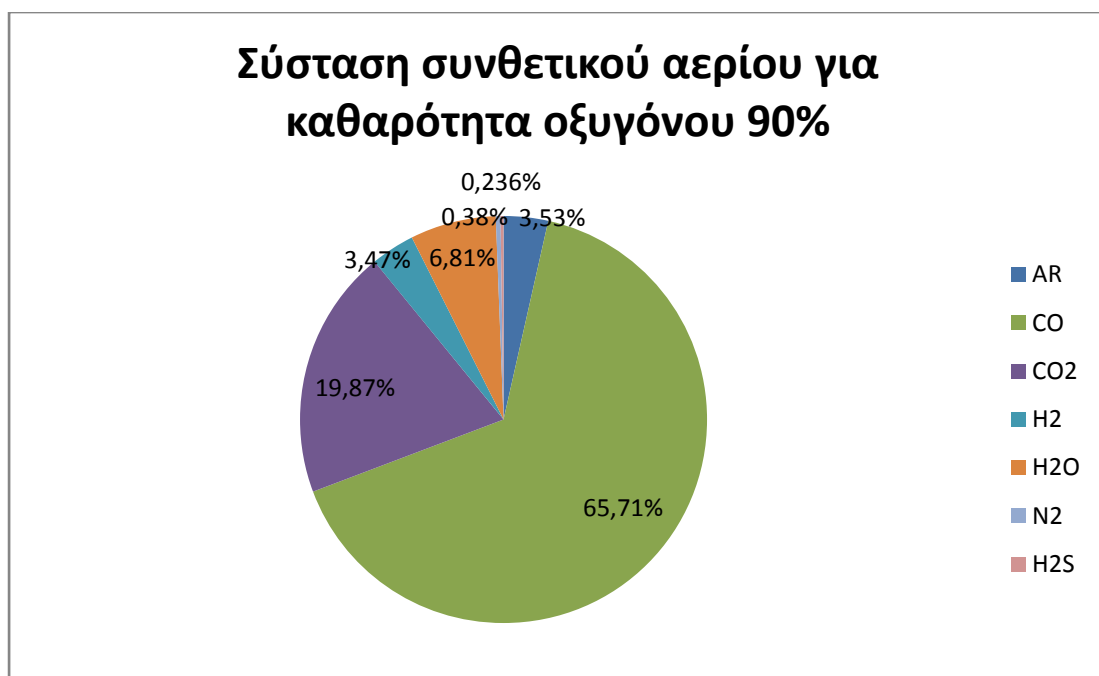
Πίνακας 9.1.1. Σύσταση συνθετικού αερίου εξερχόμενο του αεριοποιητή συναρτήσει της καθαρότητας του οξυγόνου

Καθαρότητα οξυγόνου	90%	91%	92%	93%	94%	95%	96%	98%	99,70%
AR	1,77%	1,57%	1,38%	1,19%	1,01%	0,83%	0,32%	0,32%	0,05%
CH₄	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
CO	46,88%	46,58%	46,27%	45,97%	45,69%	45,41%	44,64%	44,63%	44,22%
CO₂	9,02%	9,19%	9,36%	9,52%	9,68%	9,83%	10,25%	10,25%	10,47%
H₂	34,37%	34,47%	34,56%	34,63%	34,71%	34,78%	35,01%	34,99%	35,10%
H₂O	7,56%	7,78%	7,99%	8,20%	8,41%	8,61%	9,20%	9,20%	9,52%
N₂	0,24%	0,24%	0,28%	0,31%	0,35%	0,38%	0,42%	0,45%	0,49%
H₂S	0,17%	0,17%	0,17%	0,17%	0,17%	0,17%	0,17%	0,17%	0,16%

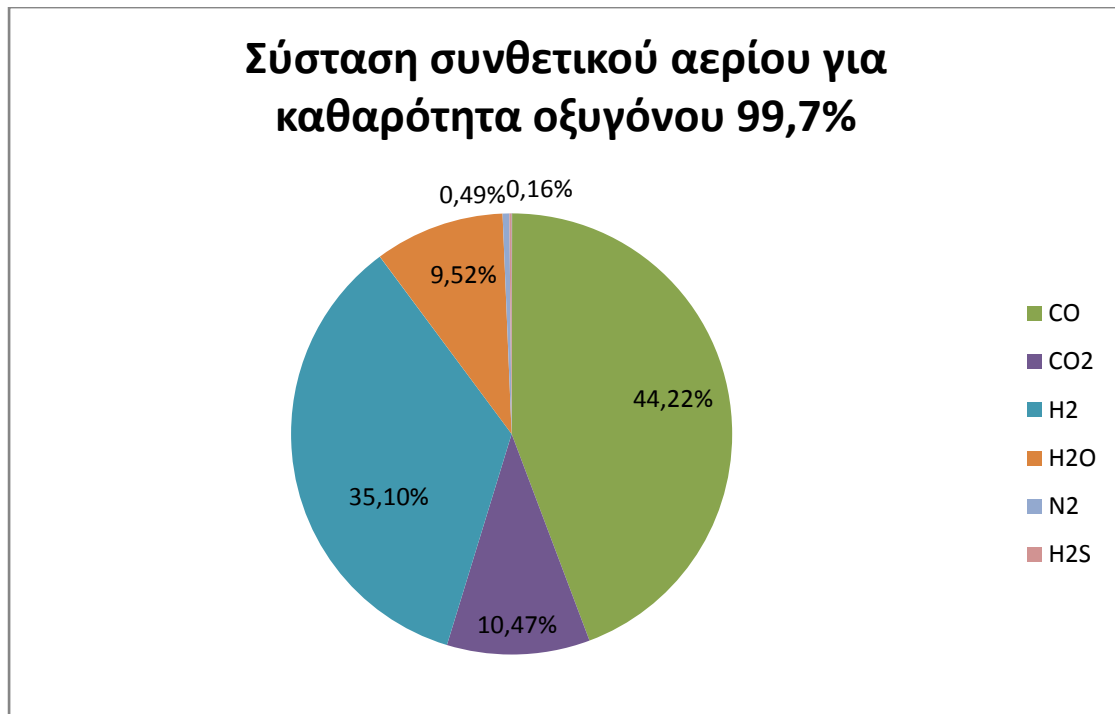
Στα παρακάτω Διαγράμματα 9.1.1, 9.1.2., 9.1.3 παρουσιάζεται σχηματικά η μεταβολή των στοιχείων του συνθετικού αερίου συναρτήσει της καθαρότητας του οξυγόνου, καθώς και η σύνθεση του συνθετικού αερίου με 90% και 99,7% καθαρότητα οξυγόνου.



Διάγραμμα 9.1.1. Μεταβολή σύστασης συνθετικού αερίου μετά τον αεριοποιητή συναρτήσει της καθαρότητας του οξυγόνου



Διάγραμμα 9.1.2. Σύσταση συνθετικού αερίου μετά τον αεριοποιητή για καθαρότητα οξυγόνου 90%



Διάγραμμα 1. Σύσταση συνθετικού αερίου μετά τον αεριοποιητή για καθαρότητα οξυγόνου 99,7%

Στη συνέχεια το συνθετικό αέριο διέρχεται από τον αφυγραντήρα, ο οποίος λειτουργεί και ως ψύκτης του με αποτέλεσμα εξερχόμενος αυτού το αέριο να έχει θερμοκρασία 25°C. Πλέον το αέριο επιδέχεται συμπίεσης και αυτό πραγματοποιείται διά του συμπιεστή όπου και συμπιέζεται στα 13 bar.

Οι ενεργειακές ανάγκες του συμπιεστή είναι 1,95 MW - 2,21 MW. Το τελικό στάδιο επεξεργασίας του συνθετικού αερίου είναι η απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα στο στοιχείο δέσμευσης CO₂. Η υψηλή θερμοκρασία του καθιστά απαγορευτική τη χρήση του στον αεριοστρόβιλο. Για το λόγω αυτό, πριν την είσοδό του SynGas στο θάλαμο καύσης, διέρχεται από ένα στοιχείο απορρόφησης θερμότητας, δια του οποίου το SynGas εξέρχεται με θερμοκρασία 90°C.

Το συνθετικό αέριο πλέον είναι καθαρό καύσιμο και η σύστασή του παρουσιάζεται ποσοτικά στον Πίνακα 9.1.2.

Πίνακας 9.1.2. Σύνθεση συνθετικού καυσίμου ως καθαρό καύσιμο συναρτήσει της καθαρότητας του οξυγόνου

Purity	90%	91%	92%	93%	94%	95%	96%	98%	99,70%
AR	2,05%	1,83%	1,62%	1,40%	1,19%	0,99%	0,78%	0,39%	0,06%
CH₄	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
CO	54,48%	54,40%	54,30%	54,22%	54,12%	54,04%	54,00%	53,93%	53,81%
CO₂	0,21%	0,21%	0,22%	0,22%	0,23%	0,23%	0,24%	0,25%	0,25%
H₂	39,94%	40,26%	40,55%	40,84%	41,12%	41,39%	41,69%	42,28%	42,71%
H₂O	2,87%	2,83%	2,81%	2,77%	2,76%	2,72%	2,62%	2,45%	2,41%
H_sS	0,20%	0,20%	0,20%	0,20%	0,20%	0,20%	0,20%	0,20%	0,20%
N₂	0,26%	0,26%	0,30%	0,34%	0,38%	0,42%	0,46%	0,51%	0,55%

Όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 9.1.2, το μονοξειδίο του άνθρακα είναι το κυριότερο συστατικό του αερίου σε ποσοστό πάνω από 85% κατά μάζα. Τα υπόλοιπα στοιχεία του αερίου είναι σχεδόν μηδαμινής σημασίας, λόγω του ελάχιστου ποσοστού που ενυπάρχουν στο αέριο.

Το ρεύμα διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτει είναι θερμοκρασίας 340°C - 380°C. Η θερμότητα αυτή απάγεται σε ένα στοιχείο απορρόφησης θερμότητας και το διοξείδιο του άνθρακα εξέρχεται σε θερμοκρασία υγροποίησής του στα 13 bar, η οποία είναι -30°C περίπου. Η θερμότητα που απάγεται είναι 222 kW – 233 kW.

Το επεξεργασμένο πλέον συνθετικό αέριο αποτελεί το αέριο καύσιμο του συνδυασμένου κύκλου της μονάδας. Εισέρχεται στο θάλαμο καύσης του αεριοστροβίλου και τα παραγόμενα καυσαέρια εκτονώνονται στο στρόβιλο αποδίδοντας στη γεννήτριά του 10 MW. Η θερμική ενέργεια του καυσαερίου είναι 21 MW και η θερμοκρασία αυτού, για δεδομένη θερμοκρασία εξόδου από το θάλαμο καύσης τους 1200 °C, τους 634°C. Η εκμετάλλευση αυτής της θερμότητας γίνεται με τον Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας. Η θερμότητα αυτή χρησιμοποιείται για την προθέρμανση, ατμοποίηση και υπερθέρμανση του κυκλώματος νερού – ατμού. Τελικώς, το καυσαέριο εξέρχεται από την καμινάδα του λέβητα με θερμοκρασία 220 °C, θερμικής ενέργειας 7 MW. Ο παραγόμενος ατμός στο λέβητα είναι πίεσης 120 bar, υπερθερμένεται μέχρι τους 550°C και εκτονώνεται στον αμμοστροβίλο αποδίδοντας στη γεννήτριά του 5 MW ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο πίνακας 9.1.3. παρουσιάζει την κατ' όγκο σύσταση των καυσαερίων που παράγονται από την καύση του συνθετικού αερίου στον αεριοστροβίλο, για κάθε τιμή καθαρότητας οξυγόνου που τροφοδοτεί τον αεριοποιητή.

Πίνακας 9.1.3. Σύνθεση καυσαερίου από καύση SynGas για κάθε τιμή καθαρότητας του οξυγόνου

Purity	90%	91%	92%	93%	94%	95%	96%	98%	99,70%
AR	1,14%	1,11%	1,09%	1,06%	1,04%	1,02%	0,99%	0,95%	0,91%
CH₄	6,46%	6,44%	6,41%	6,39%	6,37%	6,35%	6,33%	6,29%	6,26%
CO	6,39%	6,41%	6,44%	6,46%	6,48%	6,50%	6,51%	6,53%	6,57%
CO₂	72,23%	72,25%	72,27%	72,29%	72,31%	72,33%	72,36%	72,41%	72,44%
H₂	13,76%	13,77%	13,77%	13,78%	13,78%	13,78%	13,79%	13,80%	13,81%
H₂O	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%

Ο βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου υπολογίζεται ως το πηλίκο της αποδιδόμενης ενέργειας στη γεννήτρια του αεριοστροβίλου και του ατμοστροβίλου αφαιρούμενων των ενεργειακών αναγκών των τροφοδοτικών αντλιών, προς την ενέργεια του τροφοδοτούμενου καυσίμου συνθετικού αερίου στον κύκλο.

Ο βαθμός απόδοσης της μονάδας είναι η συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια της μονάδας, συγκεκριμένα από αεριοστρόβιλο και ατμοστρόβιλο, αφαιρώντας τις ενεργειακές ανάγκες της μονάδας διαχωρισμού του αέρα, του αεροσυμπιεστή και των τροφοδοτικών αντλιών του λέβητα, προς την ενέργεια του τροφοδοτούμενου τον αεριοποιητή γαιάνθρακα

Ο πίνακας 9.1.4. παρουσιάζει συνοπτικά τους ηλεκτρικούς βαθμούς απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου και της μονάδας, για κάθε τιμή καθαρότητας του οξυγόνου που εισάγεται στον αεριοποιητή.

Πίνακας 9.1.4 Ηλεκτρικοί βαθμοί απόδοσης

Καθαρότητα οξυγόνου	Ηλ.β.α. συνδυασμένου κύκλου	Ηλ.β.α. μονάδας
90,0%	48,25%	34,82%
91,0%	48,25%	34,81%
92,0%	48,24%	34,78%
93,0%	48,24%	34,78%
94,0%	48,23%	34,75%
95,0%	48,23%	34,62%
96,0%	48,22%	34,78%
98,0%	48,21%	34,88%
99,7%	48,20%	34,83%

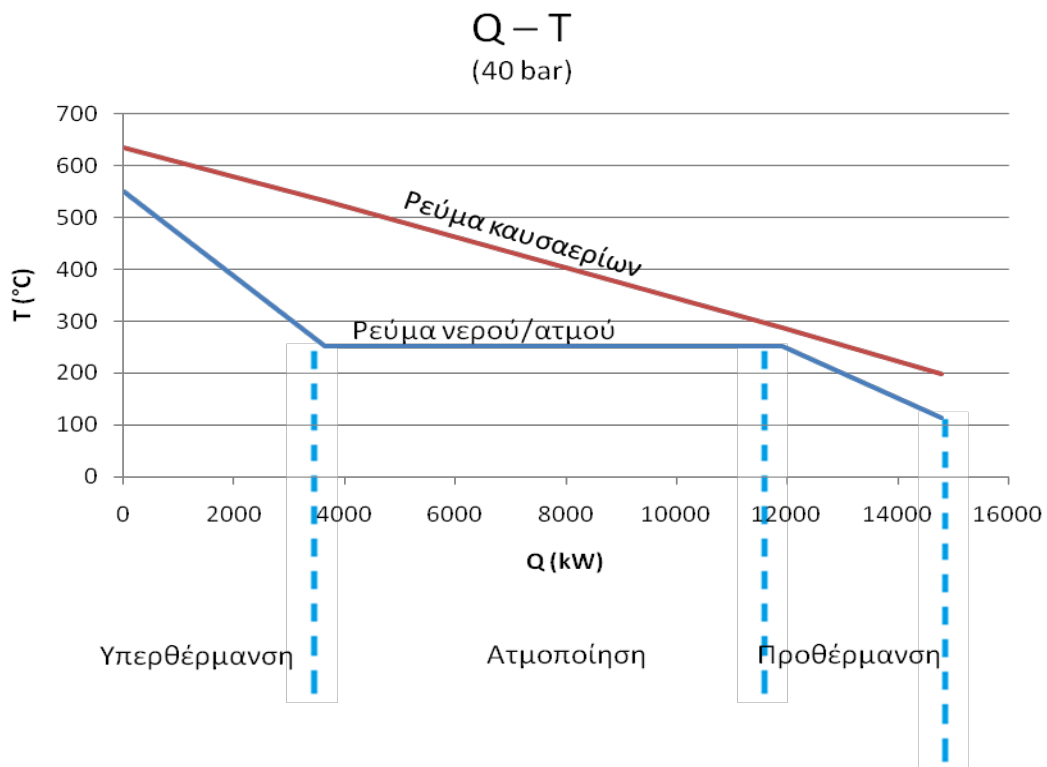
Στη συνέχεια παρουσιάζονται δοκιμές που έγιναν στο λέβητα ανάκτησης θερμότητας του κυκλώματος, στις οποίες είτε η μεταβλητή ήταν η πίεση του ατμού και σταθερά η θερμοκρασία του, είτε το αντίστροφο, δηλαδή μεταβολή της θερμοκρασίας του υπέρθερμου υπό σταθερή πίεση.

Ο Πίνακας 9.1.5. παρουσιάζει τα αποτελέσματα για τους βαθμούς απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου και ολόκληρης της μονάδας, για διαφορετικές τιμές πίεσης του υπέρθερμου ατμού, υπό σταθερή θερμοκρασία 550°C.

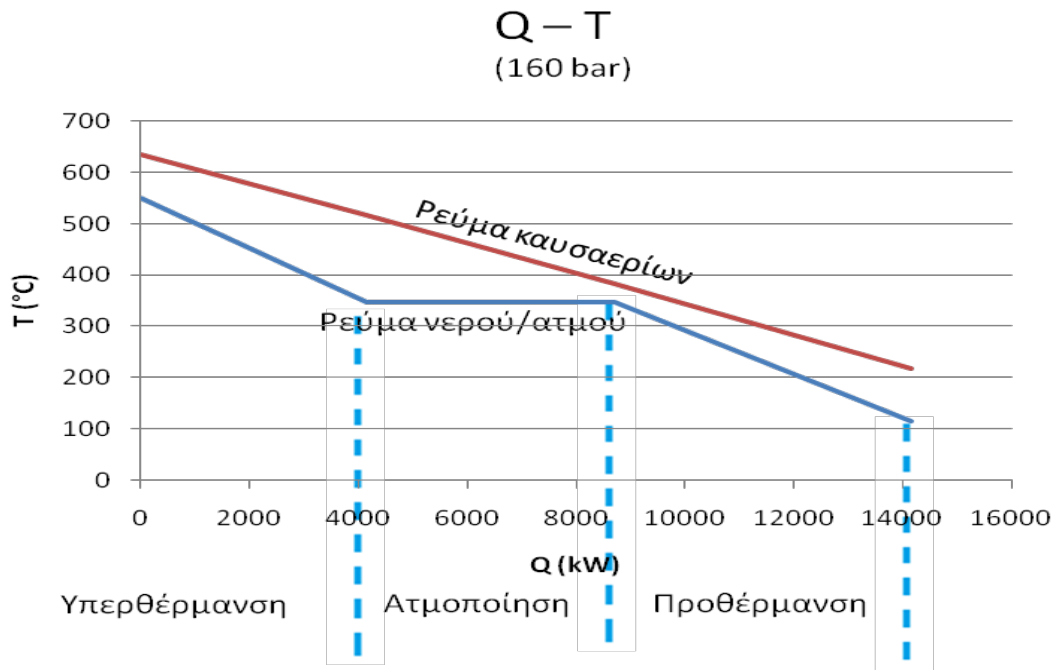
Πίνακας 9.1.5. Βαθμοί απόδοσης για τιμές πίεσης υπέρθερμου ατμού 550 °C

Πίεση υπέρθερμου ατμού (bar)	Ηλ. β.α. συνδυασμένου κύκλου	Ηλ. β.α. μονάδας
40	47,57%	34,33%
80	47,95%	34,66%
100	48,08%	34,77%
120	48,21%	34,88%
140	48,35%	35,00%
160	48,54%	35,16%

Παρατηρείται αύξηση του βαθμού απόδοσης κατά 1% περίπου με αύξηση της πίεσης. Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα Q – T για τις καταστάσεις λειτουργίας με πίεση 40 bar και 160 bar αντίστοιχα.



Διάγραμμα 9.1.4. Διάγραμμα Q-T για 40 bar / 550°C υπέρθερμου ατμού



Διάγραμμα 2. Διάγραμμα Q-T για 160 bar / 550 °C υπέρθερμου ατμού

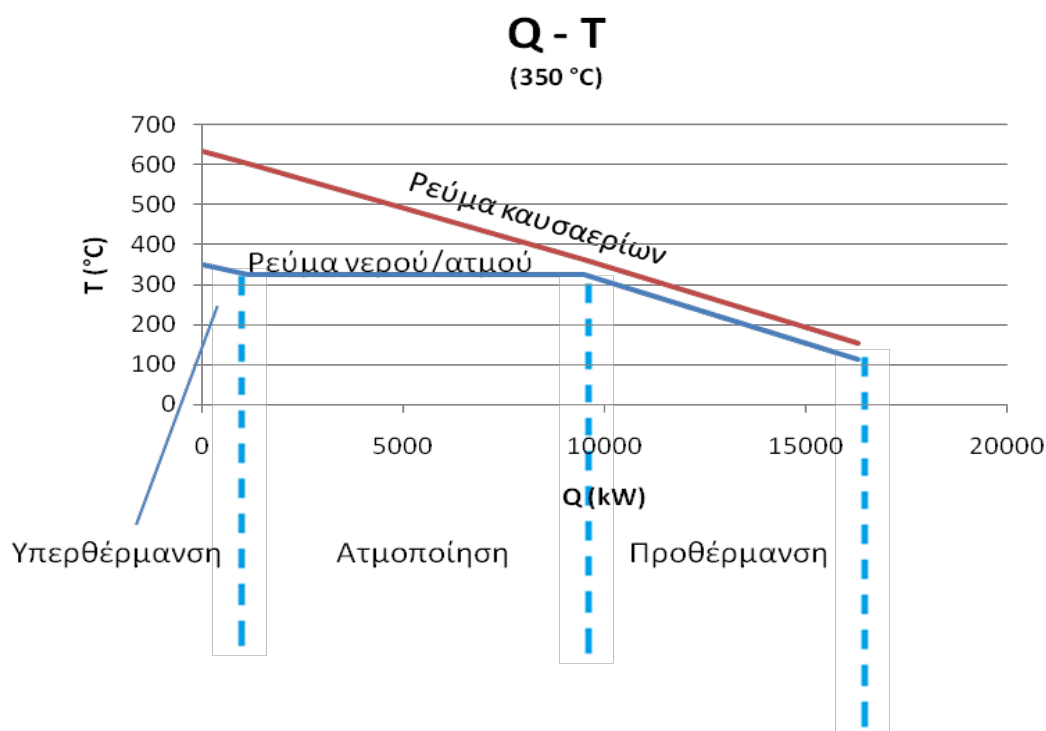
Στο διάγραμμα Q – T, 9.1.4 για ατμό 40 bar η θερμότητα του καυσαερίου που απάγεται για ατμοποίηση είναι πολύ μεγαλύτερη στο κύκλωμα ατμού 40 bar από αυτή του κυκλώματος ατμού 160 bar. Όμως, η ενεργειακή περιοχή της υπερθέρμανσης του ατμού στο κύκλωμα των 40 bar είναι πολύ μικρότερη από αυτή του κυκλώματος των 160 bar, με αποτέλεσμα την αποδοτικότερη εκμετάλλευση, από άποψη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την περίπτωση των 160 bar.

Ο Πίνακας 9.1.6. παρουσιάζει τα αποτελέσματα για τους βαθμούς απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου και ολόκληρης της μονάδας, για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας του υπέρθερμου ατμού, υπό σταθερή πίεση 120 bar.

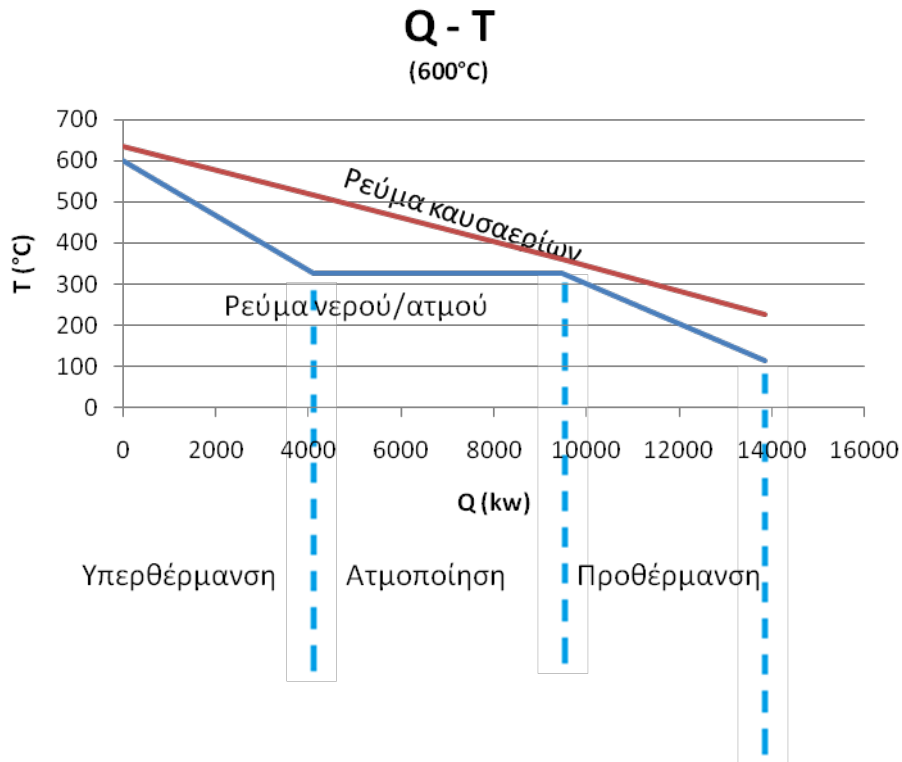
Πίνακας 9.1.6. Βαθμοί απόδοσης υπέρθερμου ατμού 120 bar

Θερμοκρασία υπέρθερμου ατμού (°C)	Ηλ. β.α. συνδυασμένου κύκλου	Ηλ. β.α. μονάδας
350	49,33%	35,84%
400	48,74%	35,33%
450	48,45%	35,09%
500	48,29%	34,95%
550	48,21%	34,88%
600	48,19%	34,86%

Αντιθέτως με τον προηγούμενο πίνακα, εδώ παρατηρείται μείωση του βαθμού απόδοσης, τόσο του συνδυασμένου κύκλου, όσο και ολόκληρης της μονάδας, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του υπέρθερμου ατμού. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί αναλύοντας τα παρακάτω διαγράμματα Q – T για 350°C και 600°C αντίστοιχα.



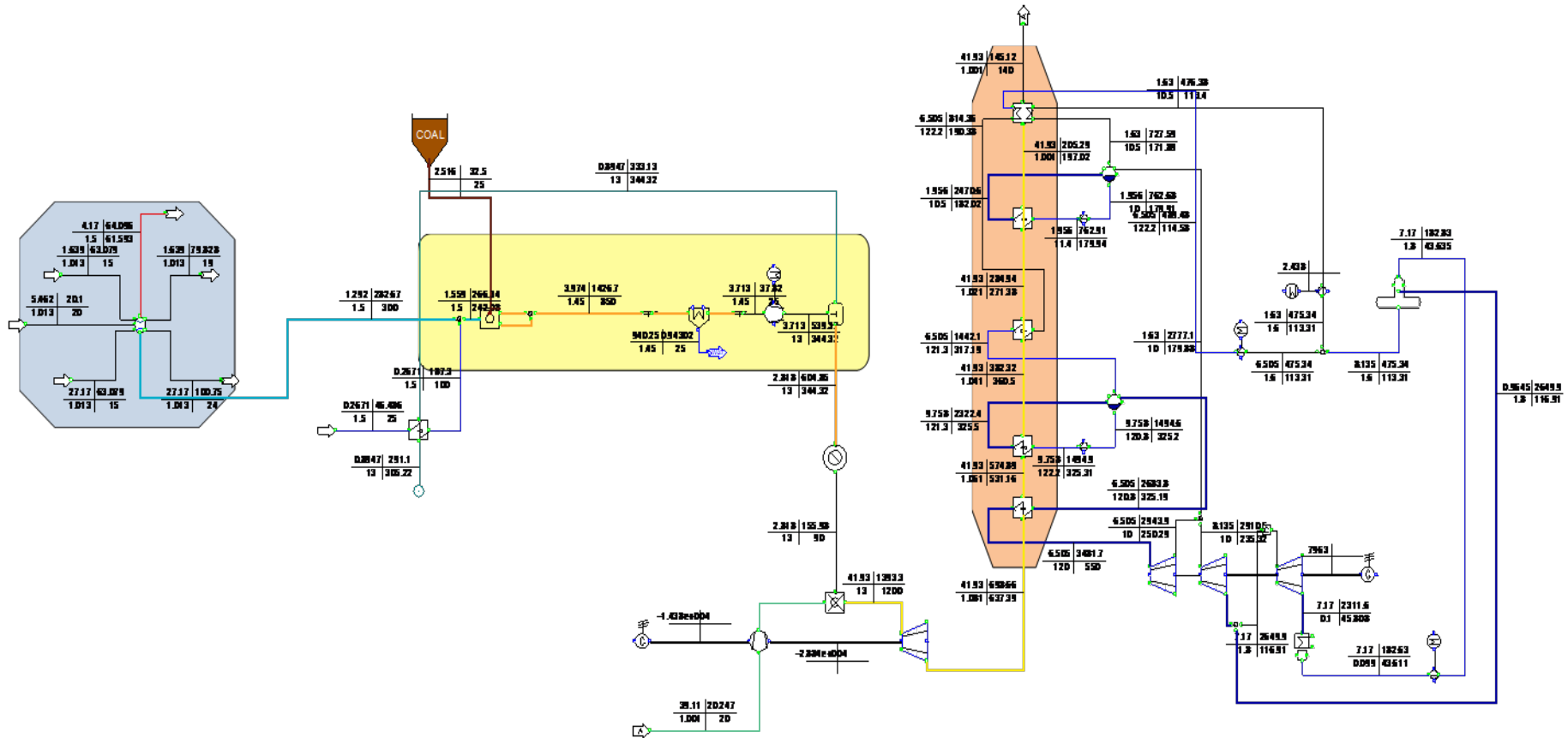
Διάγραμμα 9.1.6. Q – T διάγραμμα καυσαερίου/υπέρθερμου ατμού 350°C, 120bar



Διάγραμμα 9.1.7. Q – T διάγραμμα καυσαερίου/υπέρθερμον ατμού 600°C, 120bar

Έτσι, εξετάζοντας τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται ότι η θερμότητα που ανακτάται από το καυσαέριο για υπερθέρμανση του ατμού είναι πολύ περισσότερη όταν αυτός είναι θερμοκρασίας 350°C από ότι 600°C. Αυτό εξηγεί εν ολίγοις τη μείωση του βαθμού απόδοσης με την αύξηση της θερμοκρασίας του υπέρθερμου ατμού.

9.2. 2^η Περίπτωση κυκλώματος διπλού τυμπάνου



Εικόνα 9.2.1. Σχηματική παράσταση του κυκλώματος

Το κύκλωμα αυτό είναι όμοιο με το προηγούμενο της 1^{ης} περίπτωσης. Η διαφορά του είναι στο Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας του συνδυασμένου κύκλου, ο οποίος είναι διπλού τυμπάνου, για παραγωγή ατμού χαμηλής και υψηλής πίεσης.

Το εκτονωμένο καυσαέριο στον αεριοστρόβιλο, θερμικής ενέργειας 21,18 MW, εισέρχεται στο Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας διπλού τυμπάνου, στον οποίο έχουμε παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης 120 bar και θερμοκρασίας 550°C και ατμού χαμηλής πίεσης 10 bar σε κατάσταση κορεσμού. Ο ατμός ΥΠ εκτονώνεται στις πρώτες βαθμίδες του αμοστροβίλου μέχρι πίεσης 10 bar. Ο ατμός αυτός, προστίθεται στο ρεύμα του κορεσμένου ατμού από το τύμπανο ΧΠ του λέβητα και κατόπιν εκτονώνεται στον αεριοστρόβιλο μέχρι πίεσεως 1,8 bar. Ένα τμήμα του ατμού αποτελεί το θερμό μέσο του απαερωτή ενώ το υπόλοιπο εκτονώνεται πλήρως μέχρι 0,07 bar και μέσω του ψυγείου και της αντλίας συμπυκνώματος τροφοδοτεί την ψυχρή είσοδο του απαερωτή, κλείνοντας τον κύκλο του νερού – ατμού στον λέβητα. Οι ηλεκτρικοί βαθμοί απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και μονάδας παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.2.1.

Πίνακας 9.2.1. Βαθμοί απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και μονάδας

Καθαρότητα οξυγόνου	Ηλεκτρ. β.α. συνδυασμένου κύκλου	Ηλεκτρ. β.α. μονάδας
90,0%	49,59%	35,97%
91,0%	49,59%	35,96%
92,0%	49,58%	35,93%
93,0%	49,58%	35,92%
94,0%	49,57%	35,89%
95,0%	49,57%	35,76%
96,0%	49,56%	35,92%
98,0%	49,55%	36,02%
99,7%	49,54%	35,97%

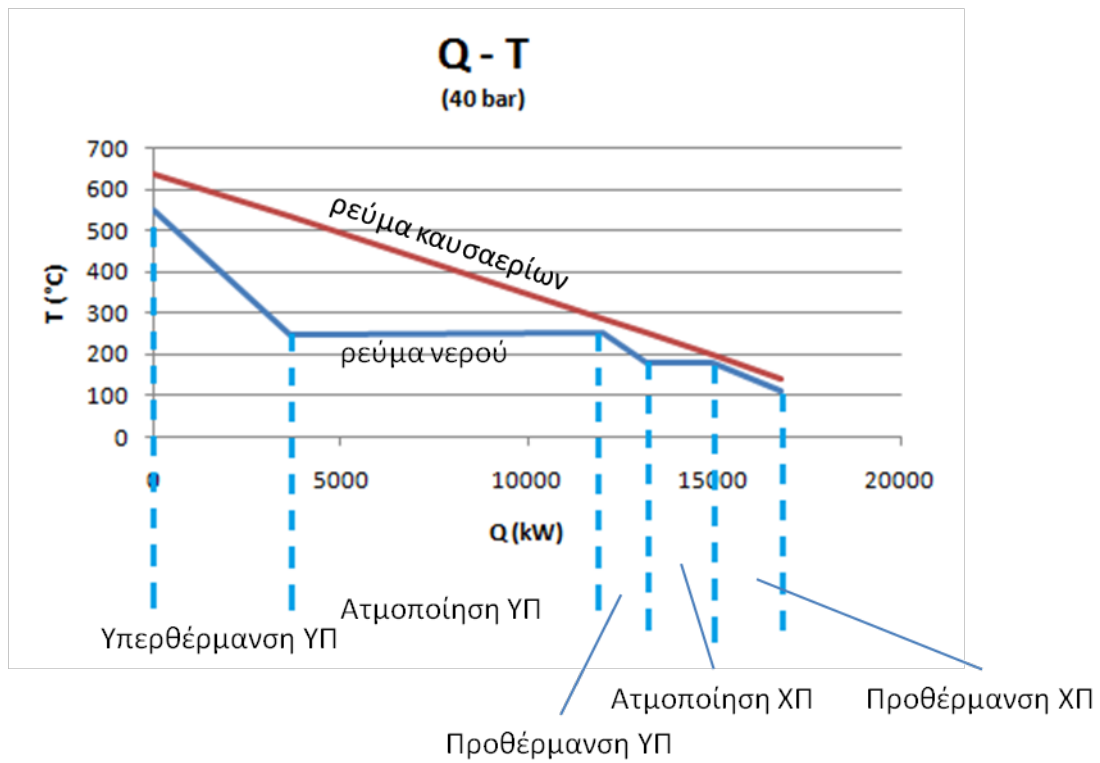
Όπως και στην περίπτωση απλού τυμπάνου, έτσι και στην περίπτωση του λέβητα διπλού τυμπάνου, γίνονται δοκιμές μεταβάλλοντας την πίεση του υπέρθερμου ατμού με σταθερή θερμοκρασία αυτού και αντίστοιχα μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία του υπέρθερμου ατμού υπό σταθερή πίεση. Και στις δύο περιπτώσεις, το pinch point τόσο του τυμπάνου υψηλής όσο και του τυμπάνου χαμηλής πίεσης, είναι σταθερό και ίσο με 35°C για το πρώτο και 15°C για το δεύτερο. Η πίεση του ατμού ΧΠ είναι σταθερή και ίση με 10 bar.

Ο Πίνακας 9.2.2 παρουσιάζει τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου και ολόκληρης της μονάδας για κάθε τιμή πίεσης του υπέρθερμου ατμού.

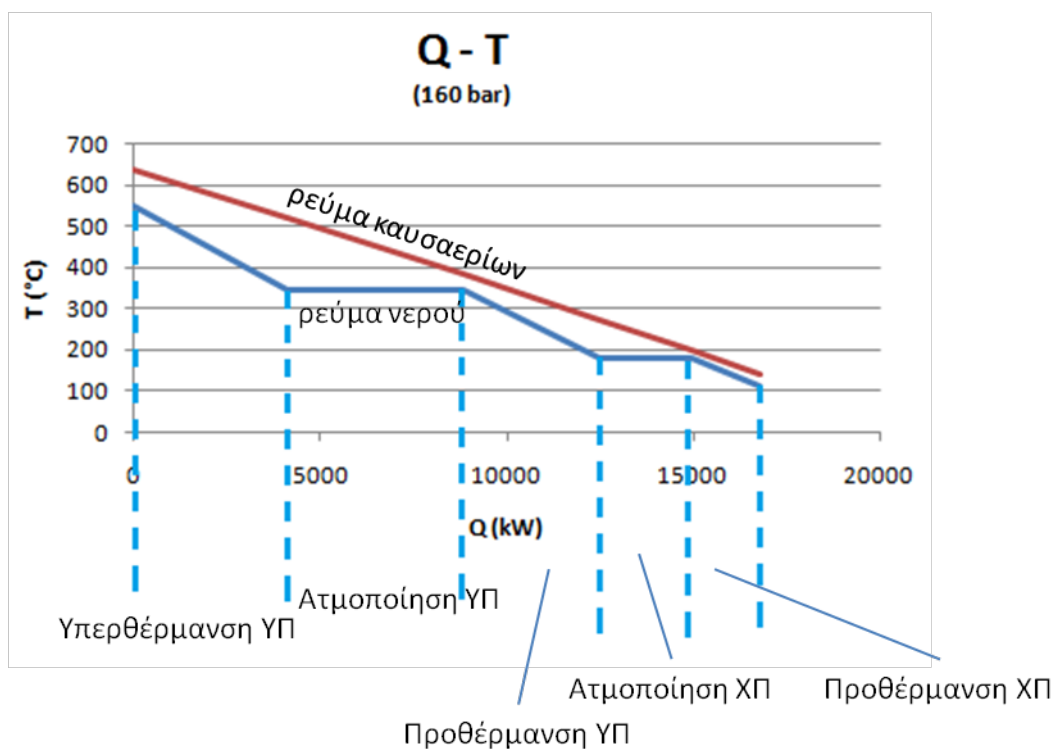
Πίνακας 9.2.2. Ηλεκτρικοί βαθμοί απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και μονάδας για σταθερή θερμοκρασία υπέρθερμου ατμού ΥΠ 550 °C.

Πίεση υπέρθερμου (bar)	Ηλεκτρ. β.α. συνδυασμένου κύκλου	Ηλεκτρ. β.α. μονάδας
40	48,33%	34,98%
80	49,16%	35,69%
100	49,38%	35,88%
120	49,55%	36,02%
140	49,68%	36,13%
160	49,79%	36,23%

Με την αύξηση της πίεσης του υπέρθερμου ατμού, αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου και της μονάδας και μάλιστα περίπου κατά 1%. Αυτό το συμπέρασμα εξάγεται και από τη θεώρηση των διαγραμμάτων Q – T που παρουσιάζονται παρακάτω για τις περιπτώσεις με πίεση υπέρθερμου ατμού 40 bar και 160 bar αντίστοιχα.



Διάγραμμα 9.2.1. Q – T διάγραμμα καυσαερίου – νερού/ατμού 40 bar/550°C



Διάγραμμα 9.2.2 Q – T διάγραμμα καυσαερίου – νερού/ατμού 160 bar/550°C

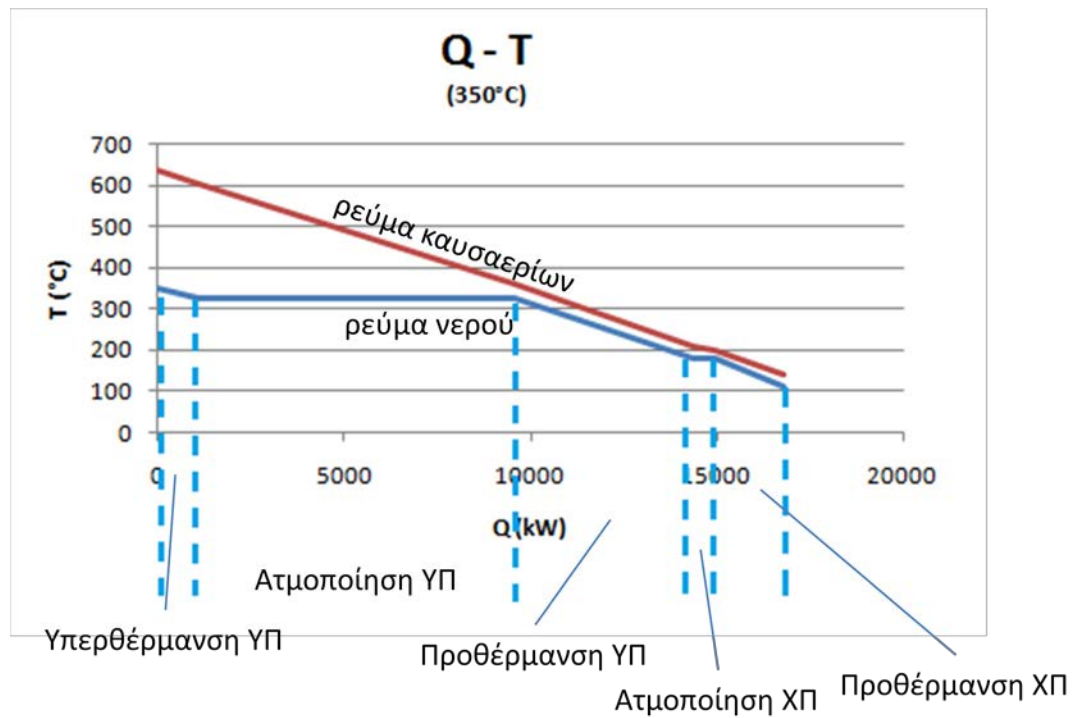
Όπως και για τις προηγούμενες περιπτώσεις, η αύξηση του βαθμού απόδοσης αιτιολογείται μέσω της απαγώμενης θερμότητας ανάκτησης για την υπερθέρμανση του ατμού. Στο διάγραμμα Q – T για πίεση 40 bar, η θερμότητα που ανακτάται από το καυσαέριο για την ατμοποίηση του νερού είναι πολύ περισσότερη από αυτή του κυκλώματος των 160 bar. Αυτό σημαίνει ότι το νερό της 2^η περίπτωσης ατμοποιείται πιο «εύκολα» με αποτέλεσμα η υπόλοιπη θερμική ενέργεια του καυσαερίου να αποδίδεται για την υπερθέρμανση πλέον του κορεσμένου ατμού. Αυτό, φυσικά φαίνεται και στο διάγραμμα, μιας και η περιοχή της θερμικής ενέργειας του καυσαερίου για την υπερθέρμανση του ατμού είναι πολύ μεγαλύτερη στο κύκλωμα των 160 bar από αυτή για το κύκλωμα των 40 bar. Αυτό δικαιολογεί τη διαφορά στο βαθμό απόδοσης, σε ότι έχει να κάνει αυτή καθ'αυτή την απόδοση του λέβητα.

Αντίστοιχος πίνακας με τον Πίνακα 9.2.2. είναι και ο Πίνακας 9.2.3. Εδώ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των βαθμών απόδοσης της μονάδας και του συνδυασμένου κύκλου για κάθε διαφορετική θερμοκρασία υπέρθερμου ατμού υπό σταθερή πίεση 120 bar.

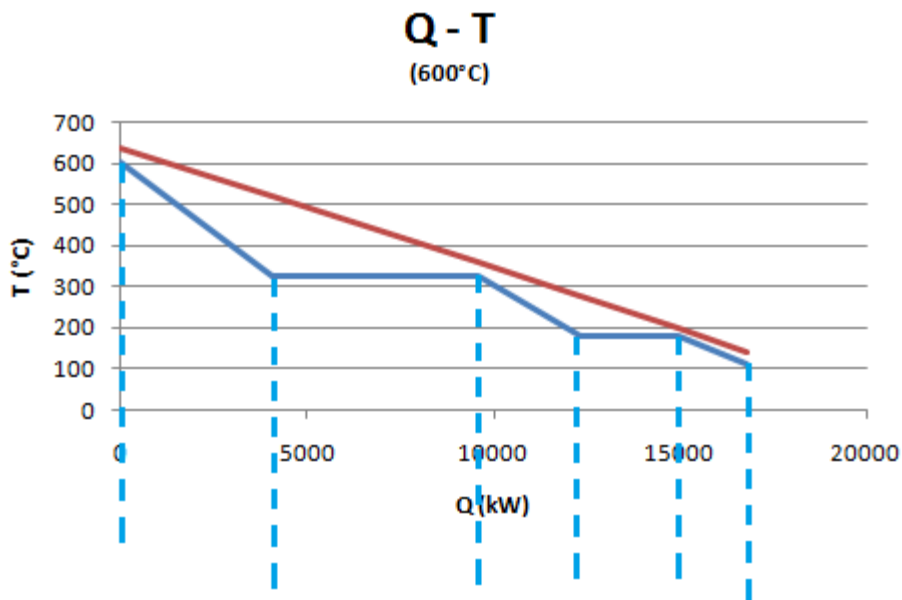
Πίνακας 9.2.3. Βαθμοί απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και μονάδας για υπέρθερμο ατμό 120 bar.

Θερμοκρασία ατμού ΥΠ (°C)	Ηλεκτρ. β.α. συνδυασμένου κύκλου	Ηλεκτρ. β.α. μονάδας
350	48,99%	35,54%
400	49,05%	35,59%
450	49,16%	35,69%
500	49,33%	35,83%
550	49,55%	36,02%
600	49,77%	36,21%

Τα αντίστοιχα διαγράμματα Q-T του κυκλώματος νερού ατμού τόσο για την περίπτωση υπέρθερμου ατμού 120bar / 350°C όσο και για αυτή των 120bar / 600°C παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 9.2.3 και 9.2.4.



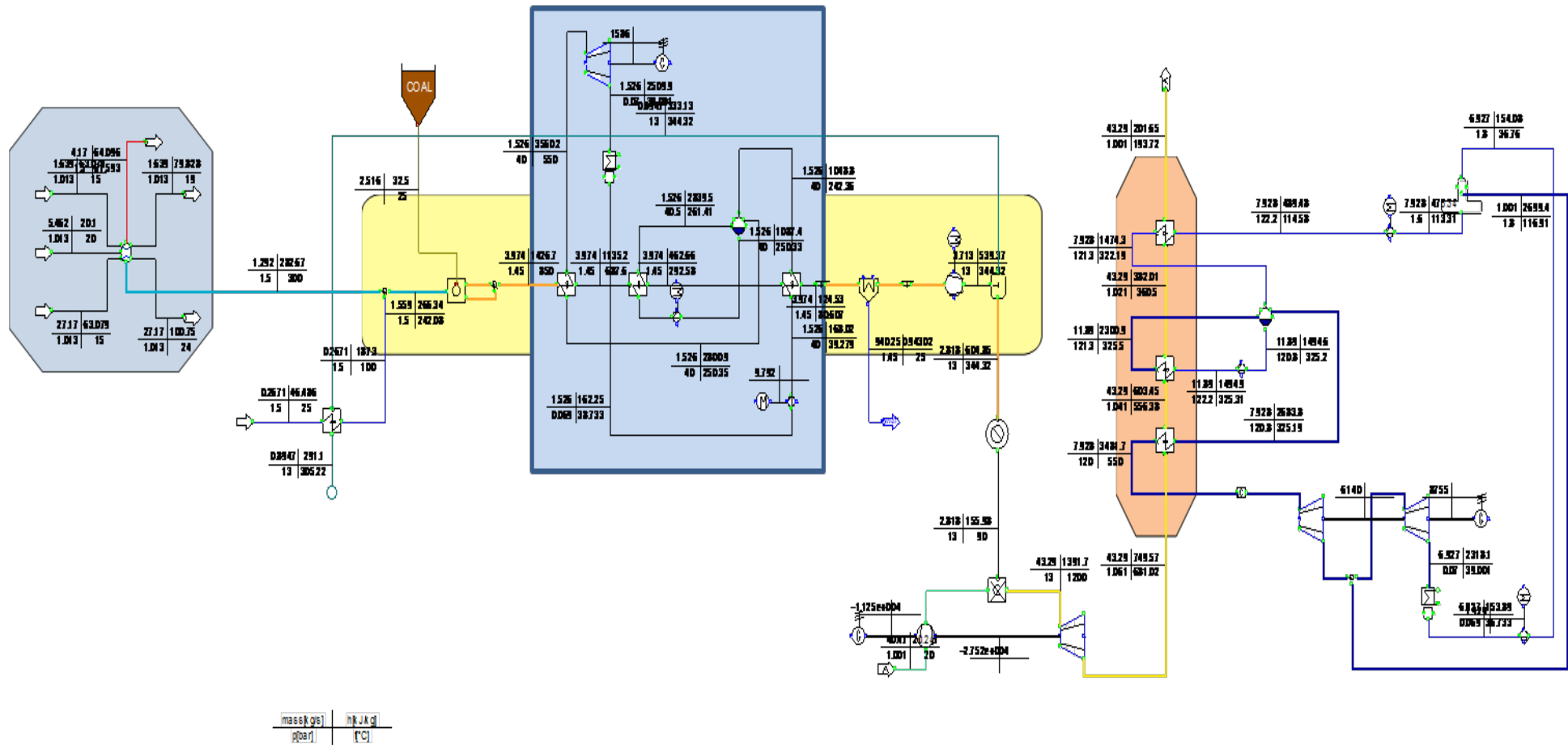
Διάγραμμα 3.2.3. Q-T διάγραμμα καυσαερίου – νερού/ατμού 350°C / 120bar



Διάγραμμα 4.2.4. Q-T διάγραμμα καυσαερίου – νερού/ατμού 600°C / 120bar

Τόσο από την ποσοτική θεώρηση του Πίνακα 9.2.3, όσο και από την ποιοτική θεώρηση των διαγραμμάτων 9.2.3. και 9.2.4., παρατηρείται η μείωση του βαθμού απόδοσης του λέβητα, αφού στην πρώτη περίπτωση των 350°C η ανακτώμενη θερμότητα του καυσαερίου για υπερθέρμανση του ατμού είναι με υπέρθερμο ατμό 600°C μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του κυκλώματος.

9.3. 3^η Περίπτωση κυκλώματος απλού τυμπάνου



Εικόνα 9.3.1. Σχηματική απεικόνιση κυκλώματος

Συνοπτική περιγραφή της μονάδας

Η μονάδα αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- Τη μονάδα διαχωρισμού του αέρα (ASU)
- Τον αεριοποιητή με οξυγόνο
- Το δευτερεύον κύκλωμα νερού/ατμού
- Τον αφυγραντήρα
- Τον αεροσυμπιεστή
- Το διαχωριστή διοξειδίου του άνθρακα
- Τον αεριοστρόβιλο
- Το Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας απλού τυμπάνου

Ο αέρας που εισέρχεται στο κύκλωμα διαχωρίζεται στα βασικά του στοιχεία, οξυγόνο και άζωτο. Το οξυγόνο τροφοδοτεί τον αεριοποιητή του κυκλώματος, αφού πρώτα έχει εμπλουτιστεί με νερό για τις ανάγκες τις αεριοποίησης. Ο γαιάνθρακας αεριοποιείται και το συνθετικό αέριο που παράγεται διέρχεται από τον πρώτο λέβητα ανάκτησης θερμότητας του κυκλώματος. Η απαγώμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για παραγωγή ατμού μέσης πίεσης και κατά συνέπεια ηλεκτροπαραγωγή. Το κρύο πλέον συνθετικό αέριο διέρχεται από τον αφυγραντήρα από το οποίο απομακρύνονται οι υδρατμοί του και συμπιέζεται από έναν συμπιεστή. Κατόπιν διέρχεται από τον διαχωριστή διοξειδίου του άνθρακα, στον οποίο απομακρύνεται το διοξείδιο του άνθρακα που εμπεριέχεται σε αυτό. Το θερμό ρεύμα του διοξειδίου του άνθρακα διέρχεται από ένα στοιχείο απορρόφησης θερμότητας στο οποίο του αποδίδει όλη του τη θερμότητα και εξέρχεται από αυτό σε υγρή κατάσταση, ώστε να είναι εφικτή η αποθήκευσή του. Το θερμό ρεύμα του συνθετικού αερίου αποτελεί πλέον το αέριο καύσιμο που τροφοδοτεί τον θάλαμο καύσης του αεριοστροβίλου. Το θερμό καυσαέριο εκτονώνεται στον αεριοστρόβιλο, και διέρχεται από τον λέβητα ανάκτησης θερμότητας του συνδυασμένου κύκλου. Η απαγώμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης για ηλεκτροπαραγωγή.

Αναλυτική παρουσίασης της μονάδας.

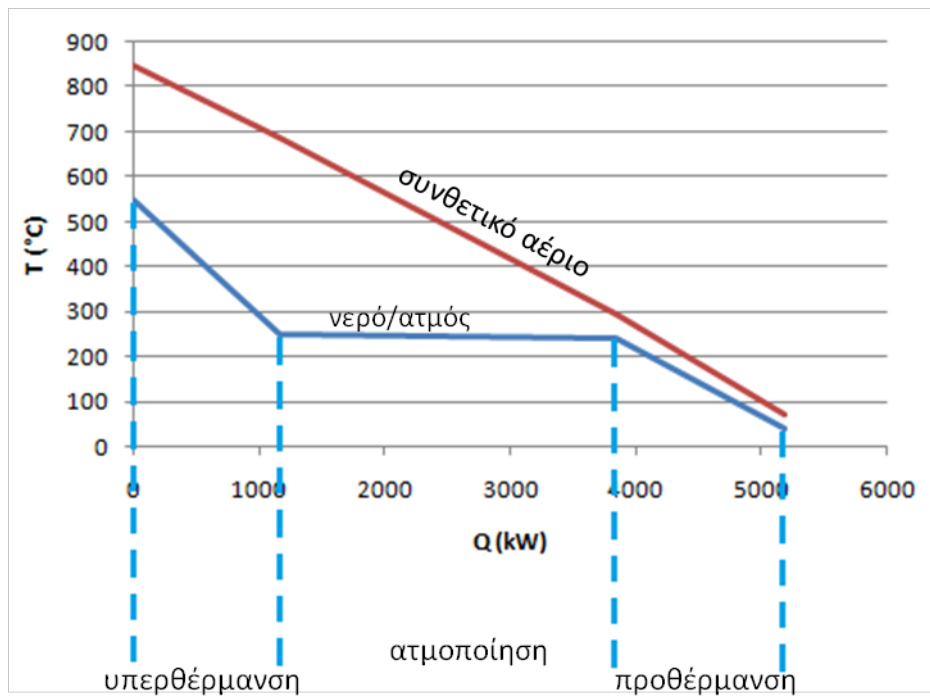
Ο αέρας εισέρχεται στη μονάδα διαχωρισμού του και μέσω αυτού παράγεται οξυγόνο με θερμοκρασία 300 °C. Ανάλογα με την επιθυμητή καθαρότητα του οξυγόνου, εξαρτάται η πίεση του, εξερχόμενο από την ASU. Το οξυγόνο στη συνέχεια αναμειγνύεται με ατμόνερο, θερμοκρασίας 100 °C. Το μείγμα οξυγόνου – ατμόνερου είναι το μέσο αεριοποίησης του ορυκτού καυσίμου, στον αεριοποιητή οξυγόνου. Η αεριοποίηση γίνεται στους 850°C.

Το ορυκτό καύσιμο, ενέργειας 50 MW, που τροφοδοτεί τον αεριοποιητή της μονάδας είναι γαιάνθρακας με την εξής σύσταση:

- C : 53,6 % w/w
- H : 3,9 % w/w
- N : 0,6 % w/w
- O : 19,2 % w/w
- S : 0,35 % w/w
- Υγρασία : 18,85 % w/w
- Τέφρα : 3,5 % w/w

Το παραγόμενο συνθετικό αέριο, λόγω της υψηλής του θερμοκρασίας, δεν μπορεί να υποστεί απ' ευθείας συμπίεση, γι'αυτό πρέπει να απολέσει σχεδόν όλη του τη θερμική ενέργεια, ώστε να μπορεί να τροφοδοτήσει τον συμπιεστή. Αυτό επιτυγχάνεται με απαγωγή θερμότητας σε ένα κύκλωμα νερού/ατμού για παραγωγή υπέρθερμου ατμού πίεσης 40 bar και θερμοκρασίας 550°C. Από το πρώτο αυτό κύκλωμα ατμοπαραγωγής παράγονται 1,523 MW ηλεκτρικής ενέργειας ενώ οι ηλεκτρικές απώλειες για λειτουργία των τροφοδοτικών αντλιών ανέρχονται μόλις στα 10 kW.

Στο Διάγραμμα 9.3.1. παρουσιάζεται η θερμοκρασία του αερίου και του νερού καθώς και η θερμότητα που συναλλάσσεται μέσω των εναλλακτών.



Διάγραμμα 9.3.1. $Q - T$ διάγραμμα συνθετικού αερίου - νερού / ατμού

Έτσι, κατά την έξοδο του από το κύκλωμα νερού/ατμού, το αέριο βρίσκεται σε θερμοκρασία 55°C - 85°C. Κατόπιν, διέρχεται από τον αφυγραντήρα προτού εισέλθει στο συμπιεστή. Από τον αφυγραντήρα χάνει το μεγαλύτερο μέρος της υγρασίας του και εξέρχεται σε θερμοκρασία 25°C . Μέσω του συμπιεστή αυξάνει η πίεσή του στα 13 bar και η θερμοκρασία του στους 340°C - 380°C. Για να καταστεί διαθέσιμο ως καύσιμο στο θάλαμο καύσης του αεριοστροβίλου, διέρχεται από τον διαχωριστή διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ separator). Εκεί απομαστεύεται το διοξείδιο του άνθρακα και η θερμότητα που μεταφέρει χρησιμοποιείται για θερμικές ανάγκες είτε συμπαραγωγής είτε θέρμανσης χώρου, συμβολίζοντάς τες με ένα στοιχείο απορρόφησης θερμότητας. Το ρεύμα διοξειδίου του άνθρακα εξέρχεται με θερμοκρασία τέτοια ώστε να μπορεί να αποθηκευτεί σε υγρή μορφή, που στην πίεση των 13 bar η θερμοκρασία αυτή είναι στους -30 °C.

Όπως παρατηρείται το αέριο καύσιμο είναι πλούσιο σε μονοξείδιο του άνθρακα ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία ενυπάρχουν σε πολύ μικρότερα ποσοστά. Το καυσάριο που παράγεται εκτονώνεται στον στρόβιλο του αεριοστροβίλου και παράγονται 10,7 MW ηλεκτρικής ενέργειας και κατόπιν διέρχονται μέσα

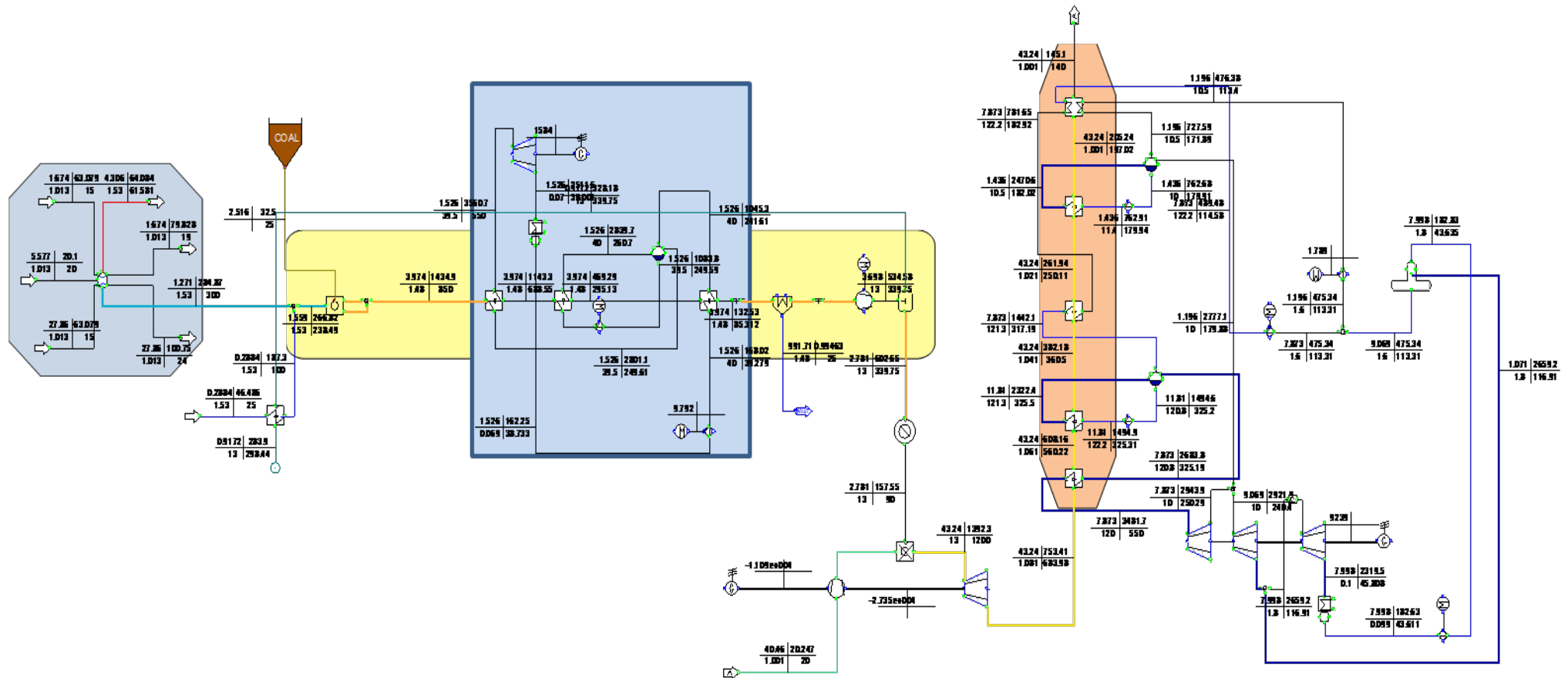
από τον Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας για παραγωγή υπέρθερμου ατμού υψηλής πίεσης. Τα καυσαέρια εισέρχονται στο λέβητα με θερμική ενέργεια 32,5 MW και θερμοκρασία 681 °C και εξέρχονται από αυτόν με υπολειπόμενη θερμική ενέργεια 8,7 MW και θερμοκρασία 194 °C. Τα περίπου 23,8 MW θερμότητας που απάγονται στο λέβητα, παράγουν υπέρθερμο ατμό 550°C και 120 bar. Ο ατμός εκτονώνεται στον αμοστρόβιλο και έτσι παράγονται 8,4 MW ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου είναι το πηλίκο της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής στον αεριοστρόβιλο και στον αμοστρόβιλο, μειωμένη κατά τις ενεργειακές απαιτήσεις για συμπίεση του νερού στο κύκλωμα νερού ατμού, προς την προστιθέμενη ενέργεια του καυσίμου που καίγεται στο θάλαμο καύσης. Ομοίως, ο βαθμός απόδοσης όλης της μονάδας υπολογίζεται ως το πηλίκο της συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, συν την εκμεταλλευόμενη θερμική ενέργεια, αφαιρώντας τις ενεργειακές απώλειες για λειτουργία αντλιών και συμπιεστών, προς τη χημική ενέργεια του ορυκτού καυσίμου που τροφοδοτεί τον αεριοποιητή οξυγόνου. Ο πίνακας 9.3.1. συνοψίζει τους ηλεκτρικούς βαθμούς απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου και ολόκληρης της μονάδας για κάθε τιμή καθαρότητας του οξυγόνου που τροφοδοτεί τον αεριοποιητή.

Πίνακας 9.3.1. Ηλεκτρικοί βαθμοί απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και μονάδας

Καθαρότητα οξυγόνου	Ηλεκτρ. β.α. συνδ. κύκλου	Ηλεκτρ. β.α. μονάδας
90,0%	44,35%	34,50%
91,0%	44,34%	34,49%
92,0%	44,33%	34,46%
93,0%	44,33%	34,46%
94,0%	44,32%	34,43%
95,0%	44,32%	34,30%
96,0%	44,31%	34,46%
98,0%	44,29%	34,56%
99,7%	44,28%	34,52%

9.4. 4^η Περίπτωση κυκλώματος διπλού τυμπάνου



Εικόνα 9.4.1. Σχηματική απεικόνιση του κυκλώματος

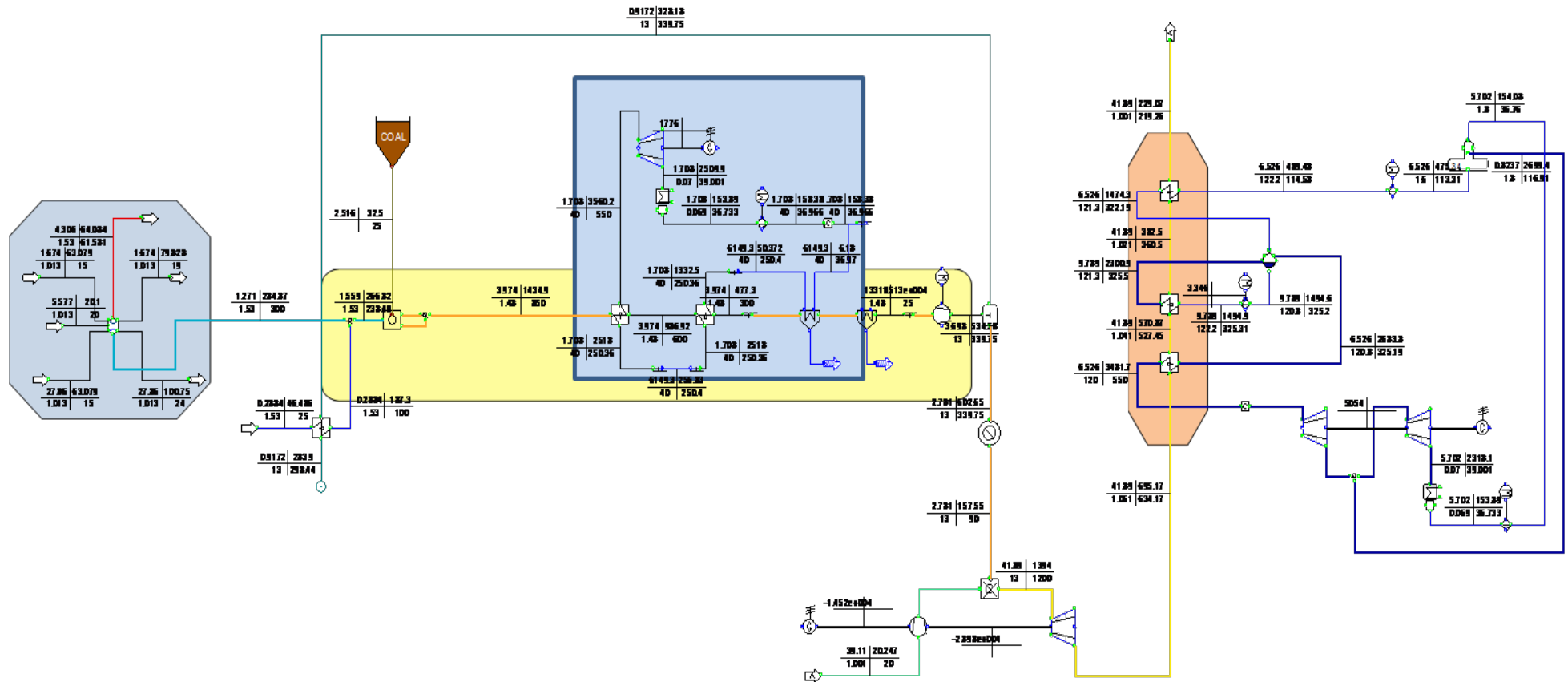
Το κύκλωμα αυτό είναι παρόμοιο με το κύκλωμα της περίπτωσης 2.1. Η μοναδική διαφορά έγκειται στο Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας του συνδυασμένου κύκλου, ο οποίος εδώ είναι διπλού τυμπάνου.

Το καυσαέριο εξέρχεται από τον αεριοστρόβιλο με θερμική ενέργεια 32,5 MW. Η θερμική αυτή ενέργεια γίνεται εκμεταλλεύσιμη διά του δεύτερου Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας της μονάδας . Ο λέβητας αυτός είναι διπλού τυμπάνου, έχουμε δηλαδή ατμοπαραγωγή υψηλής και μέσης πίεσης. Ο ατμός υψηλής πίεσης είναι ομοίως πίεσης 120bar και θερμοκρασίας 550°C ενώ ο ατμός χαμηλής πίεσης είναι κορεσμένος ατμός στα 10bar. Ο ατμός ΥΠ εκτονώνεται μέχρι τα 10 bar στις πρώτες βαθμίδες του αμοστροβίλου. Κατόπιν, ενώνεται με το ρεύμα του κορεσμένου ατμού που προέρχεται από το τύμπανο χαμηλής πίεσης και το ρεύμα αυτού του ατμού χαμηλής πίεσης εκτονώνεται μέχρι τα 1,8 bar στις επόμενες βαθμίδες του αμοστροβίλου. Ένα μέρος του ατμού των 1,8bar τροφοδοτεί απ'ευθείας τον απαερωτή ενώ το υπόλοιπο εκτονώνεται πλήρως πλέον, μέχρι τα 0,07 bar στον αμοστροβίλο και το συμπύκνωμα αυτό, τροφοδοτεί τον απαερωτή, κλείνοντας το κύκλωμα νερού – ατμού. Έτσι στα άκρα της γεννήτριας του αμοστροβίλου παράγονται 8,9 MW ηλεκτρικής ενέργειας. Ομοίως παρατίθεται ο Πίνακας 9.4.1. που παρουσιάζει τους ηλεκτρικούς βαθμούς απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου αλλά και συνολικά της μονάδας.

Πίνακας 9.4.1. Ηλεκτρικοί βαθμοί απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και μονάδας

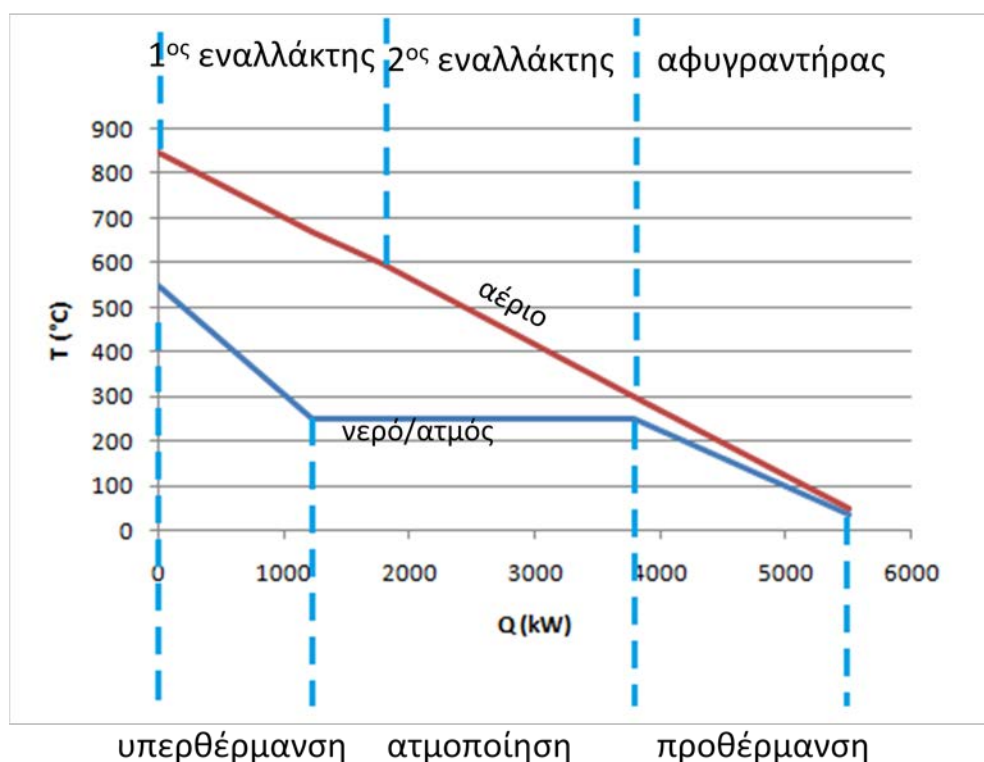
Καθαρότητα οξυγόνου	Ηλεκτρ. β.α. συνδυασμένου κύκλου	Ηλεκτρ. β.α. μονάδας
90,0%	45,12%	35,15%
91,0%	45,11%	35,14%
92,0%	45,10%	35,12%
93,0%	45,10%	35,11%
94,0%	45,09%	35,08%
95,0%	45,09%	34,95%
96,0%	45,08%	35,11%
98,0%	45,06%	35,21%
99,7%	45,05%	35,17%

9.5. 5^η Περίπτωση κυκλώματος απλού τυμπάνου



Εικόνα 9.5.1. Σχηματική απεικόνιση κυκλώματος

Το κύκλωμα αυτό είναι παρόμοιο με αυτό της περίπτωσης 9.3. Η διαφορά έγκειται στη δομή του δευτερεύοντος κυκλώματος νερού/ατμού. Στο παρόν κύκλωμα η προθέρμανση του νερού γίνεται μέσω του αφυγραντήρα του αερίου. Έτσι η θερμότητα που απάγεται από το αέριο κατά την ψύξη του, χρησιμοποιείται για προθέρμανση του νερού. Το νερό εισέρχεται στον αφυγραντήρα υπόψυκτο και προθερμείται σε αυτόν μέχρι τη θερμοκρασία ατμοποίησής του. Έτσι εξέρχεται ως ατμόνερο. Στη συνέχεια εισέρχεται στον 2^ο εναλλάκτη θερμότητας όπου και συνεχίζεται η ατμοποίησή του. Τέλος η ατμοποίηση και η υπερθέρμανση ολοκληρώνεται στον 1^ο εναλλάκτη. Το Διάγραμμα 9.5.1. δείχνει την συναλλαγή θερμότητας μεταξύ νερού και αερίου και την εκάστοτε θερμοκρασία αυτών.



Διάγραμμα 9.5.1 Q – T διάγραμμα αερίου – νερού/ατμού

Αναλυτικότερα, το συνθετικό αέριο εισέρχεται στο λέβητα με θερμοκρασία 850°C. Το κύκλωμα του νερού-ατμού είναι κατ' αντιρροή με το ρεύμα του συνθετικού αερίου. Όταν εξέρχεται από το κύκλωμα νερού/ατμού το συνθετικό αέριο βρίσκεται σε θερμοκρασία 50°C. Η απαγόμενη θερμότητα του καυσαερίου ατμοποιεί και υπερθερμαίνει το νερό και αυτό εισέρχεται στον

ατμοστρόβιλο με 550 °C και 40 bar. Έτσι, από την εκτόνωση του ατμού παράγονται 1,6 MW.

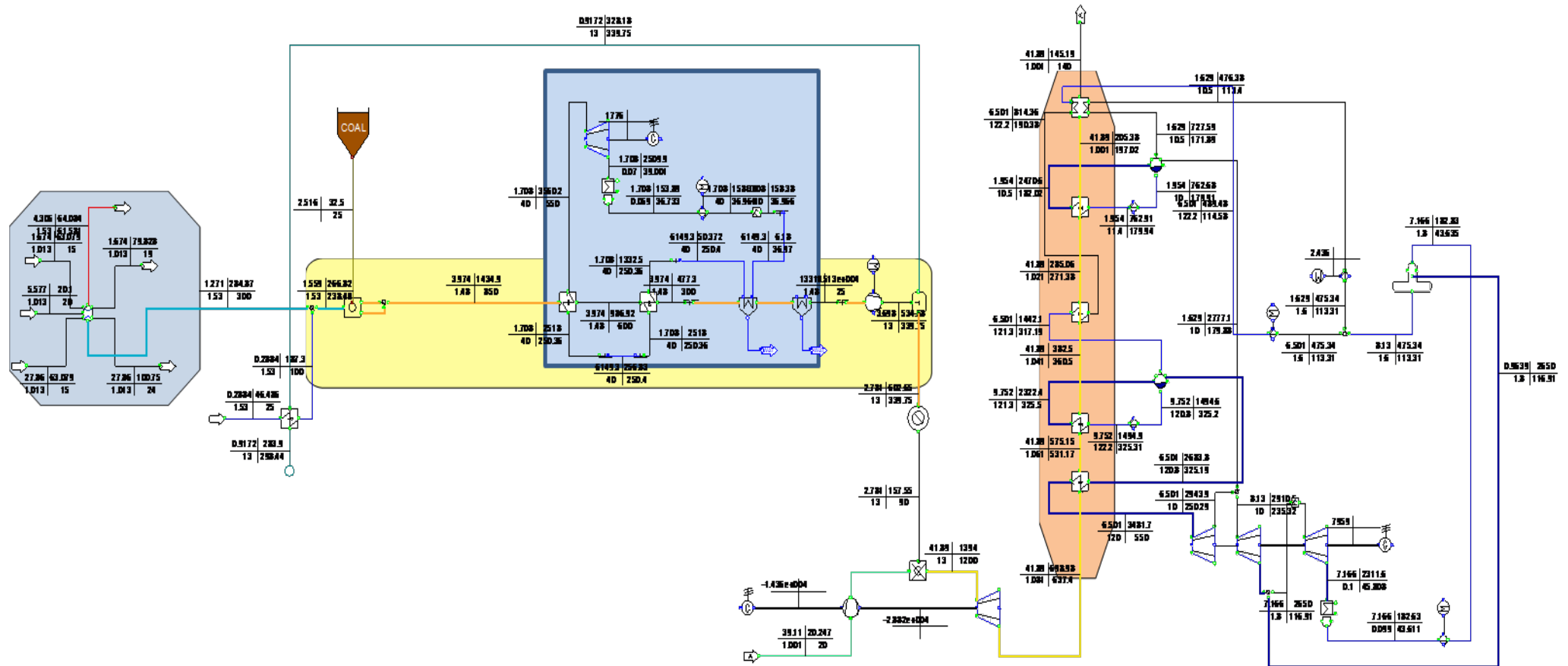
Λόγω απαιτήσεων ποιότητας του αερίου καθώς και μικρότερων ενεργειακών απωλειών της κατόπιν συμπίεσής του, το αέριο υφίσταται περαιτέρω ψύξη και αφύγρανση μέσω ενός δεύτερου αφυγραντήρα. Έτσι, λοιπόν, το αέριο ψύχεται μέχρι τους 25°C και εισέρχεται στον αεριοσυμπιεστή.

Η συνέχεια του κυκλώματος είναι η ίδια όπως και στα προηγούμενα κυκλώματα απλού τυμπάνου. Ο πίνακας 9.5.1 παρουσιάζει τους ηλεκτρικούς βαθμούς απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου και συνολικά της μονάδας για κάθε τιμή καθαρότητας του τροφοδοτούμενου οξυγόνου στον αεριοποιητή.

Πίνακας 9.5.1 Ηλεκτρικοί βαθμοί απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και μονάδας

Καθαρότητα οξυγόνου	Ηλ. Β.Α. συνδυασμένοι κύκλου	Ηλεκτρ. Β.Α. μονάδας
90,0%	48,25%	37,93%
91,0%	48,25%	37,96%
92,0%	48,24%	37,95%
93,0%	48,24%	37,97%
94,0%	48,23%	37,97%
95,0%	48,23%	37,87%
96,0%	48,22%	38,06%
98,0%	48,21%	38,22%
99,7%	48,20%	38,22%

9.6. 6^η Περίπτωση κυκλώματος με λέβητα διπλού τυμπάνου



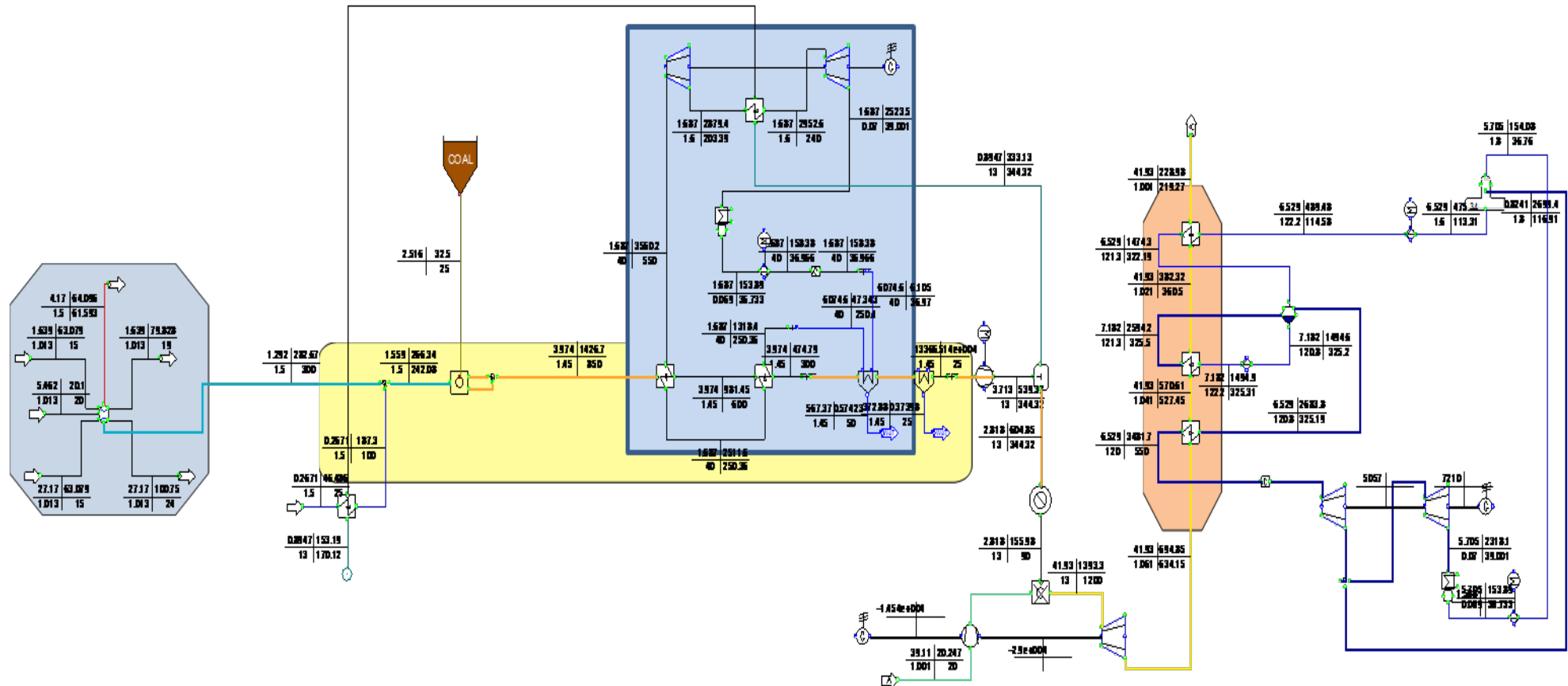
Εικόνα 9.6.1. Σχηματική απεικόνιση κυκλώματος

Η μονάδα αυτή είναι όμοια με την προηγούμενη της περίπτωσης 9.5. με τη διαφορά ότι ο Λέβητας Ανάκτησης Θερμότητας είναι διπλού τυμπάνου. Έτσι η θερμότητα του καυσαερίου από τον αεριοστρόβιλο χρησιμοποιείται για παραγωγή υπέρθερμου ατμού 120bar/550°C και την παραγωγή κορεσμένου ατμού χαμηλής πίεσης 10bar. Η μετατροπή αυτή του λέβητα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των ηλεκτρικών βαθμών απόδοσης, οι οποίοι συνοψίζονται στον πίνακα για κάθε τιμή καθαρότητας του οξυγόνου που τροφοδοτεί τον αεριοποιητή.

Πίνακας 9.6.1. Ηλεκτρικοί βαθμοί απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και μονάδας για κάθε τιμή καθαρότητας οξυγόνου

Καθαρότητα οξυγόνου	Ηλεκτρ. β.α. συνδυασμένου κύκλου	Ηλεκτρικός β.α. μονάδας
90,0%	49,59%	39,08%
91,0%	49,59%	39,10%
92,0%	49,58%	39,10%
93,0%	49,58%	39,12%
94,0%	49,57%	39,11%
95,0%	49,57%	39,01%
96,0%	49,56%	39,20%
98,0%	49,55%	39,36%
99,7%	49,54%	39,36%

9.7. 7^η Περίπτωση κυκλώματος απλού τυμπάνου



Εικόνα 9.7.1 Σχηματική αναπαράσταση μονάδας

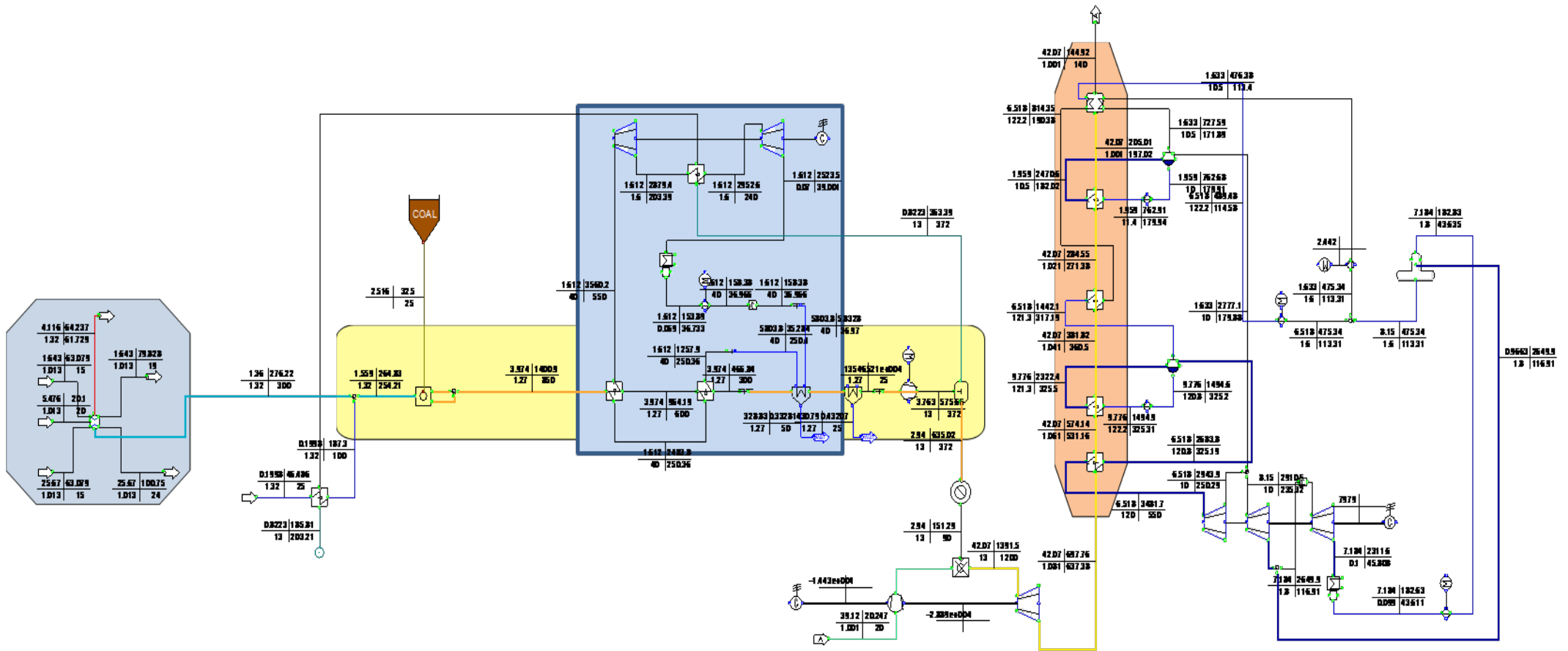
Όπως παρατηρείται, η μονάδα αυτή είναι παρόμοια με τη μονάδα της περίπτωσης 9.5. Η διαφορά βρίσκεται στο δευτερεύον κύκλωμα παραγωγής υπέρθερμου ατμού. Σε αυτή την περίπτωση δεν έχουμε πλήρη εκτόνωση του υπέρθερμου ατμού στο στρόβιλο, αλλά μερική εκτόνωσή του μέχρι τα 1,6 bar. Ο ατμός αναθερμίνεται από το ζεστό ρεύμα διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτει από το παραγόμενο συνθετικό αέριο, διά του διαχωριστή CO₂, και ανέρχεται τους 240 °C.

Η επιπρόσθετη εκμετάλλευση της θερμότητας του διοξειδίου του άνθρακα το κύκλωμα νερού/ατμού επιφέρει άνοδο του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης της μονάδας, αφού παράγεται περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια στον αμοστρόβιλο του κυκλώματος. Ο πίνακας 9.7.1. περιλαμβάνει τους ηλεκτρικούς βαθμούς απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου και της μονάδας συναρτήσει των τιμών καθαρότητας του οξυγόνου που τροφοδοτεί τον αεριοποιητή.

Πίνακας 9.7.1 Ηλεκτρικοί βαθμοί απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και συνολικής μονάδας για τιμές καθαρότητας τροφοδοτούμενου οξυγόνου στον αεριοποιητή.

Καθαρότητα οξυγόνου	Ηλεκτρ. β.α. συνδ. κύκλου	Ηλεκτρ. β.α. μονάδας
90,0%	48,25%	38,11%
91,0%	48,25%	38,14%
92,0%	48,24%	38,14%
93,0%	48,24%	38,16%
94,0%	48,23%	38,15%
95,0%	48,23%	38,05%
96,0%	48,22%	38,25%
98,0%	48,21%	38,42%
99,7%	48,20%	38,42%

9.8. 8^η Περίπτωση κυκλώματος διπλού τυμπάνου



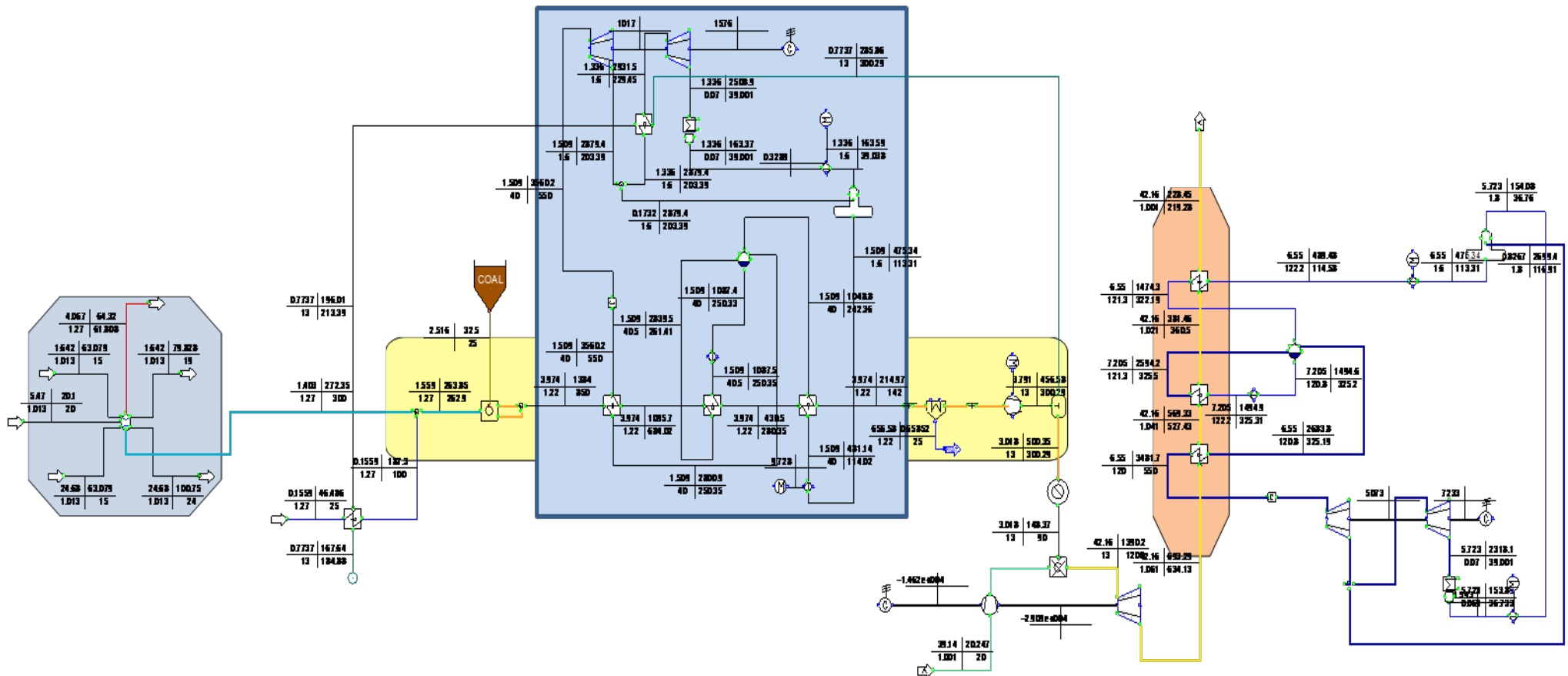
Εικόνα 9.8.1. Σχηματική περιγραφή μονάδας.

Η μονάδα αυτή είναι η ίδια με την προηγούμενη της περίπτωσης 9.7 μόνο που ο λέβητας ανάκτησης θερμότητας είναι διπλού τυμπάνου, για παραγωγή υπέρθερμου ατμού ΥΠ 120 bar/550°C και για παραγωγή κορεσμένου ατμού ΧΠ 10 bar. Όπως και στη μελέτη κάθε ηλεκτροπαραγωγικής μονάδας, έτσι και στη συγκεκριμένη παρατίθενται οι ηλεκτρικοί βαθμοί απόδοσης τόσο του συνδυασμένου κύκλου αλλά όσο και συνολικά της μονάδας.

Πίνακας 9.8.1 Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και συνολικής μονάδας για κάθε τιμή καθαρότητας οξυγόνου.

Καθαρότητα οξυγόνου	Ηλεκτρ. β.α. συνδ. κύκλου	Ηλεκτρ. β.α. μονάδας
90,0%	49,59%	39,26%
91,0%	49,59%	39,28%
92,0%	49,58%	39,28%
93,0%	49,58%	39,30%
94,0%	49,57%	39,30%
95,0%	49,57%	39,19%
96,0%	49,56%	39,39%
98,0%	49,55%	39,56%
99,7%	49,54%	39,56%

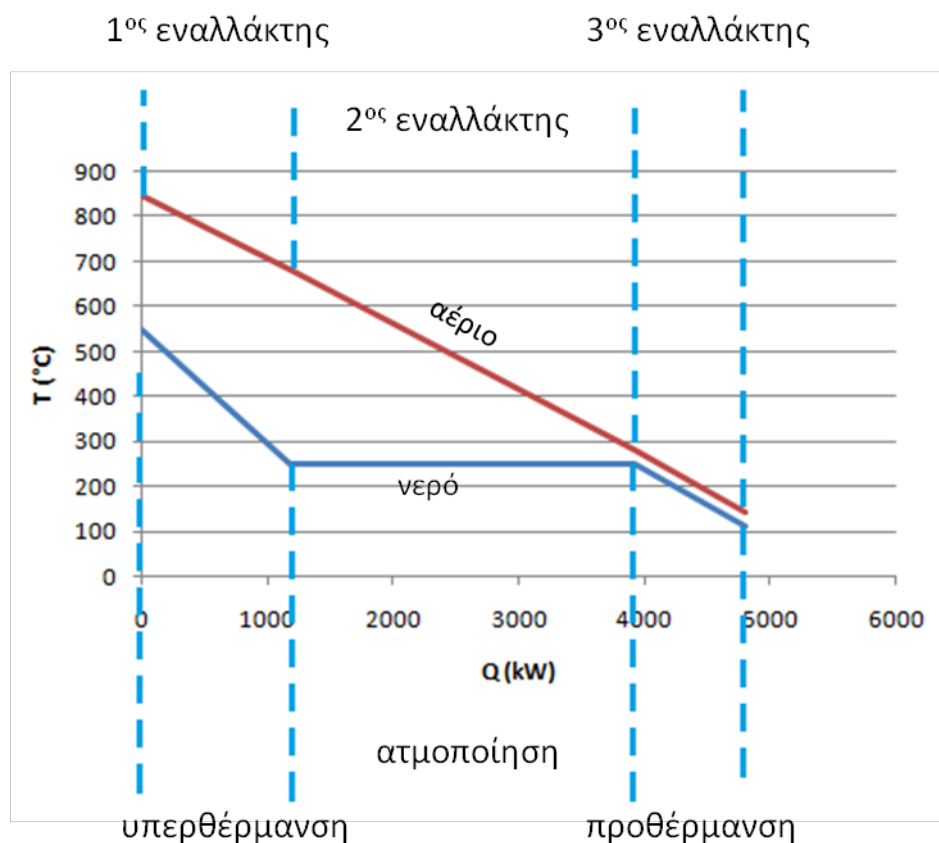
9.9. 9^η Περίπτωση Κυκλώματος απλού τυμπάνου



Εικόνα 9.9.1. Σχηματική απεικόνιση της μονάδας

Η ηλεκτροπαραγωγική αυτή μονάδα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 9.9.1, εκμεταλλεύεται τη θερμότητα του συνθετικού αερίου που παράγεται στον αεριοποιητή. Είναι παρόμοια με τη μονάδα της περίπτωσης 2.1. Η διαφορά έγκειται στο δευτερεύον κύκλωμα νερού/ατμού. Στην παρούσα μονάδα, ο υπέρθερμος ατμός δεν εκτονώνεται πλήρως στον ατμοστρόβιλο, αλλά μέχρι της πίεσεως των 1,6 bar όπου υφίσταται αναθέρμανση από τη θερμότητα του μονοξειδίου του άνθρακα που προκύπτει από τον διαχωριστή. Ο υπέρθερμος ατμός που παράγεται είναι 550°C και 40 bar και μετά την μερική εκτόνωση αναθερμίνεται κατά 20°C - 30°C.

Το διάγραμμα παριστάνει τη συναλλαγή θερμότητας μεταξύ αερίου και νερού/ατμού και τις αντίστοιχες θερμοκρασίες



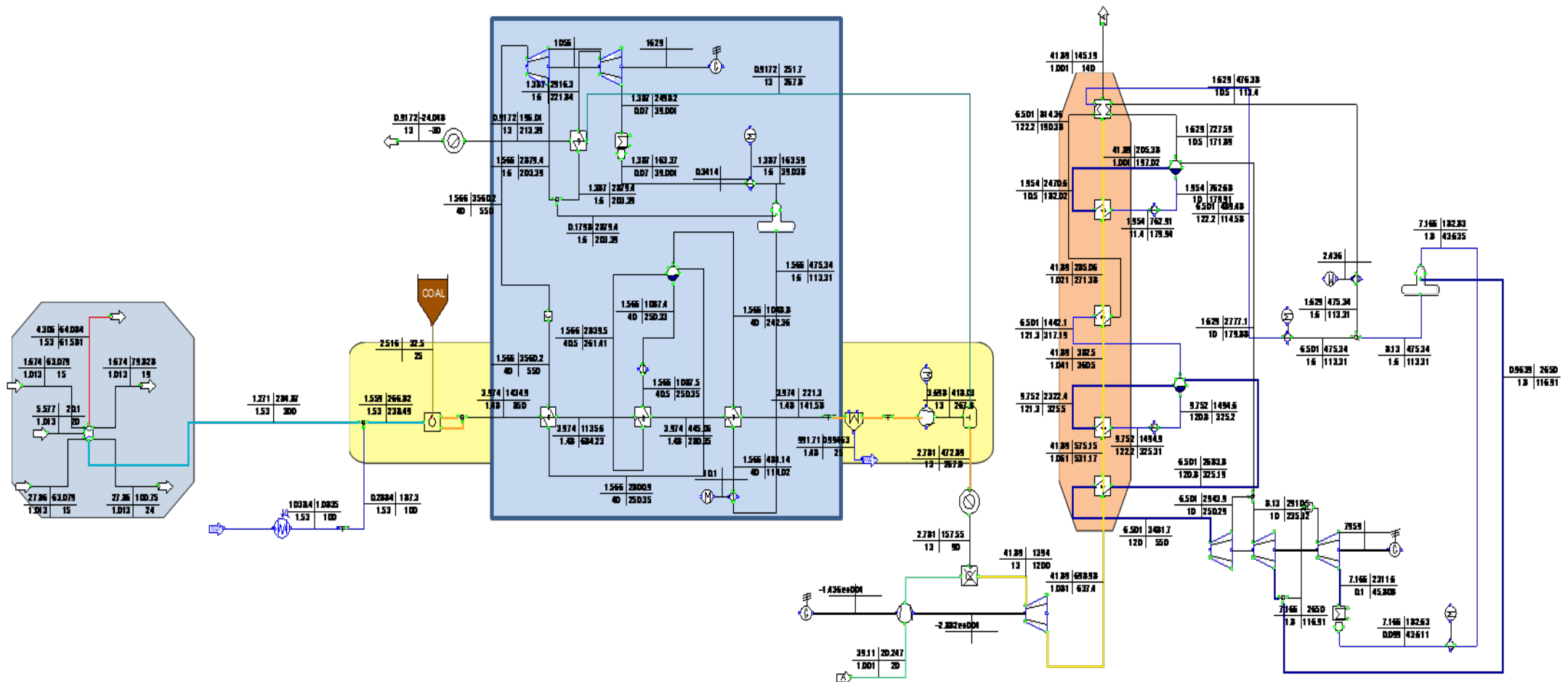
Διάγραμμα 9.9.1. $Q - T$ διάγραμμα αερίου - νερού/ατμού για καθαρότητα οξυγόνου 98%

Ο πίνακας 9.9.1. παρουσιάζει συνοπτικά τους ηλεκτρικούς βαθμούς απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου και συνολικά της μονάδας για κάθε τιμή καθαρότητας οξυγόνου που τροφοδοτεί τον αεριοποιητή.

Πίνακας 9.9.1. Ηλεκτρικοί βαθμοί απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και μονάδας για διάφορες τιμές καθαρότητας οξυγόνου που τροφοδοτείται στον αεριοποιητή

Καθαρότητα οξυγόνου	Ηλεκτρ. β.α. συνδυασμένου κύκλου	Ηλεκτρ. β.α. μονάδας
90,0%	48,25%	38,83%
91,0%	48,25%	38,82%
92,0%	48,24%	38,80%
93,0%	48,24%	38,79%
94,0%	48,23%	38,77%
95,0%	48,23%	38,64%
96,0%	48,22%	38,79%
98,0%	48,21%	38,86%
99,7%	48,20%	38,83%

9.10. 10^η Περίπτωση κυκλώματος διπλού τυμπάνου



Εικόνα 9.10.1. Σχηματική απεικόνιση μονάδας

Όπως σε κάθε μονάδα με λέβητα απλού τυμπάνου που έχει μελετηθεί, μελετάται και η αντίστοιχη μονάδα με λέβητα διπλού τυμπάνου. Έτσι και εδώ η μονάδα αυτή είναι όμοια με αυτή της περίπτωσης 9.9 μόνο που ο ΛΑΘ είναι διπλού τυμπάνου, για την παραγωγή ατμού ΥΠ και ΧΠ αντίστοιχα. Το μόνο που μεταβάλλεται είναι οι ηλεκτρικοί βαθμοί απόδοσης, οι οποίοι συνοψίζονται στον Πίνακα. για κάθε τιμή καθαρότητας του τροφοδοτούμενου οξυγόνου.

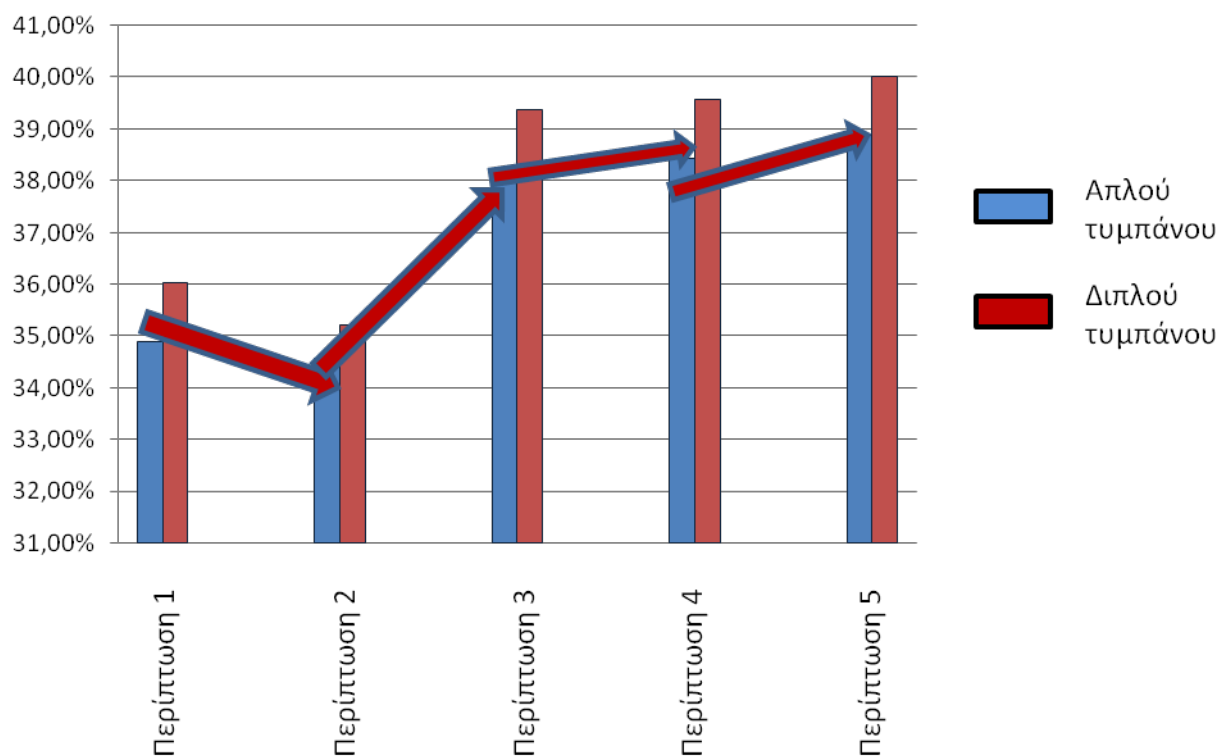
Πίνακας 9.10.1. Ηλεκτρικοί βαθμοί απόδοσης συνδυασμένου κύκλου και μονάδας για διαφορετικές τιμές καθαρότητας οξυγόνου.

Καθαρότητα οξυγόνου	Ηλεκτρ. β.α. συνδυασμένου κύκλου	Ηλεκτρ. β.α. μονάδας
90,0%	49,59%	39,98%
91,0%	49,59%	39,97%
92,0%	49,58%	39,95%
93,0%	49,58%	39,94%
94,0%	49,57%	39,91%
95,0%	49,57%	39,78%
96,0%	49,56%	39,93%
98,0%	49,55%	40,00%
99,7%	49,54%	39,97%

9.11. Σύνοψη για τις μονάδες χωρίς μεθανοποίηση

Οι μονάδες που μελετήθηκαν βασίζονται στην παραγωγή και «καθαρισμό» του συνθετικού αερίου. Το συνθετικό αέριο μετά την αφύγρανση, συμπίεση και απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα, αποτελεί το αέριο καύσιμο του συνδυασμένου κύκλου. Το αέριο καύσιμο αποτελείται από CO σε ποσοστό κατά μάζα 86% - 90%. Τα παραγόμενα καυσαέρια ως εκ τούτου περιέχουν άζωτο κατά 70% w/w, 15% w/w οξυγόνο, 4% w/w νερού, 10% w/w διοξειδίου του άνθρακα και 1% w/w αργού.

Όπως έγινε αντιληπτό, η διαφοροποίηση των μονάδων έγκειται στον τρόπο της εκμετάλλευσης της θερμικής ενέργειας του συνθετικού αερίου και δευτερευόντως της θερμότητας των καυσαερίων (απλού-διπλού τυμπάνου). Το διάγραμμα παρουσιάζει τους διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης κάθε μονάδας τόσο με λέβητα απλού όσο και με λέβητα διπλού τυμπάνου και για την περίπτωση που το οξυγόνο που τροφοδοτεί τον αεριοποιητή είναι καθαρότητας 98%.



Διάγραμμα 9.11.1. Σύγκριση ηλεκτρικών βαθμών απόδοσης για την περίπτωση κάθε μονάδας που μελετήθηκε.

Από το διάγραμμα γίνεται φανερό ότι στις περιπτώσεις στις οποίες ανακτάται θερμότητα από το ζεστό ρεύμα διοξειδίου του άνθρακα για αναθέρμανση του ατμού στο δευτερευόν κύκλωμα, ο βαθμός απόδοσης είναι κατά 3% μεγαλύτερος, συγκριτικά με τις άλλες μονάδες. Επίσης παρατηρείται σημαντική αύξηση το ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης στη μονάδα με ΛΑΘ διπλού τυμπάνου από την ίδια μονάδα απλού τυμπάνου. Η διαφορά αυτή ανέρχεται στο 1%.

Κεφάλαιο 10. Σύγκριση μονάδων

Όπως αναφέρθηκε, ένας από τους στόχους της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η σύγκριση των ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων που αφομοιώνουν την αεριοποίηση με οξυγόνο του ορυκτού καυσίμου και την πρόσθετη ή μη διαδικασία παραγωγής SNG.

Η σύγκριση των κυκλωμάτων δύναται να διακριτοποιηθεί σε δύο επιμέρους κατηγορίες :

- 1) Δομική σύγκριση (εξοπλισμός, διαδικασία κ.ο.κ)
- 2) Ποιοτική σύγκριση (σύνθεση παραγόμενων αερίων, βαθμοί απόδοσης)

10.1 Δομική σύγκριση

Όπως αναφέρθηκε, τα κυκλώματα διαφοροποιούνται ως προς τη διαδικασία επεξεργασίας του συνθετικού αερίου που παράγεται στον αεριοποιητή. Έτσι έχουμε τα κυκλώματα διαχείρισης και επεξεργασίας του συνθετικού αερίου με σκοπό τη μετατροπή του σε αέριο πλούσιο σε μεθάνιο, και τα κυκλώματα στα οποία το συνθετικό αέριο είναι αυτό που αποτελεί το καύσιμο του αεριοστροβίλου.

Πέραν αυτής της βασικής διαφοροποίησης, υπάρχει και αυτή ως προς την εκμετάλλευση της μεταφερόμενης θερμικής ενέργειας από το συνθετικό αέριο ή το παραγόμενο καυσαέριο από τον αεριοστρόβιλο. Έτσι η θερμότητα αυτή είτε χρησιμοποιείται για άμεσες θερμικές ανάγκες, όπως θέρμανση χώρων, βιομηχανικές εφαρμογές κλπ είτε για ηλεκτροπαραγωγή από ατμοπαραγωγή. Έτσι υπάρχουν κυκλώματα με λέβητες ανάκτησης θερμότητας απλού τυμπάνου, διπλού τυμπάνου καθώς και λέβητες με στοιχεία προθέρμανσης, ατμοποίησης και υπερθέρμανσης τα στοιχεία επεξεργασίας του συνθετικού αερίου.

Η επιπρόσθετη επεξεργασία του συνθετικού αερίου για μετατροπή του σε SNG απαιτεί επιπλέον δομικές μονάδες, όπως ο αντιδραστήρας

μετατόπισης και ο αντιδραστήρας μεθανοποίησης. Αυτό, προφανώς, προκαλεί αύξηση του κόστους κατασκευής της μονάδας.

Όσον αφορά τις ομοιότητες, αυτές εντοπίζονται μέχρι το στάδιο της αεριοποίησης. Όλα τα κυκλώματα χρησιμοποιούν την ίδια μονάδα διαχωρισμού του αέρα και τον ίδιο αεριοποιητή.

10.2 Ποιοτική σύγκριση

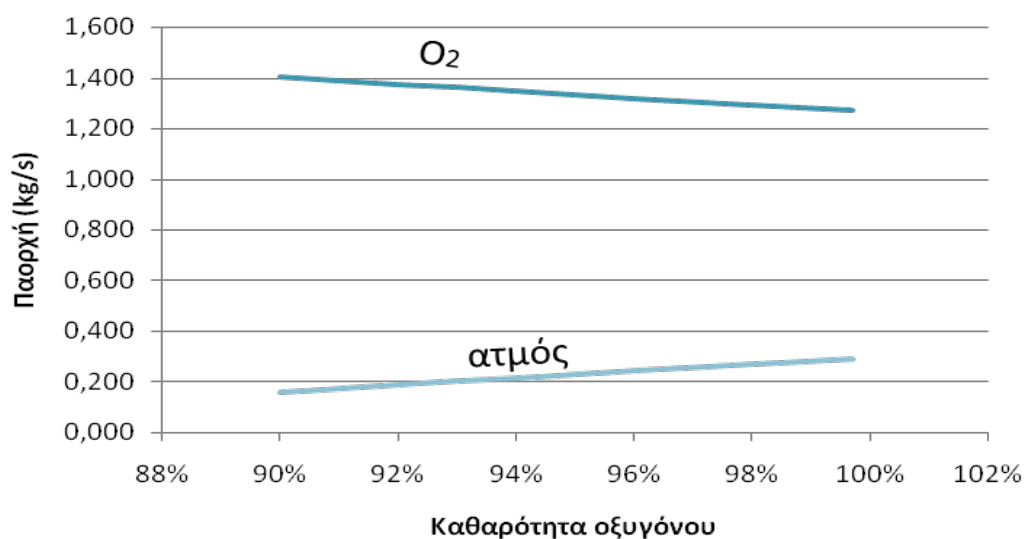
Όλα τα κυκλώματα που εξετάστηκαν, λόγω της δομικής ομοιότητας μέχρι το στάδιο της αεριοποίησης, παρουσιάζουν και ποιοτικές ομοιότητες στα αντίστοιχα προϊόντα τους.

Η βασική παράμετρος για τον αεριοποιητή των κυκλωμάτων είναι η θερμοκρασία αεριοποίησης (και κατ' επέκταση του παραγόμενου συνθετικού αερίου) να είναι οι 850°C. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η αντιστοιχία παροχής οξυγόνου στον αεριοποιητή και καθαρότητάς του να είναι η ίδια για όλα τα κυκλώματα. Αυτή παρουσιάζεται στον Πίνακα 10.2.1. :

Πίνακας 10.2.1. Απαιτούμενη παροχή οξυγόνου στον αεριοποιητή συναρτήσει της καθαρότητάς του

Καθαρότητα οξυγόνου	Παροχή οξυγόνου (kg/sec)	Παροχή πρόσθετου ατμού (kg/sec)
90%	1,403	0,156
91%	1,389	0,171
92%	1,374	0,186
93%	1,360	0,2
94%	1,346	0,214
95%	1,332	0,228
96%	1,318	0,241
98%	1,292	0,267
99,7%	1,271	0,288

Και γραφικά στο Διάγραμμα 10.2.1.



Διάγραμμα 10.2.1. Μεταβολή της απαιτούμενης παροχής του οξυγόνου στον αεριοποιητή ανάλογα με την εκάστοτε επιθυμητή καθαρότητά του

Η πτώση της παροχής του οξυγόνου με την αύξηση της καθαρότητάς του είναι αναμενόμενη. Αυτό λόγω της διαφορετικής πίεσης από την οποία εξέρχεται το οξυγόνο από τη μονάδα διαχωρισμού του αέρα. Αυτός ο συσχετισμός παρουσιάζεται στον Πίνακα 10.2.2:

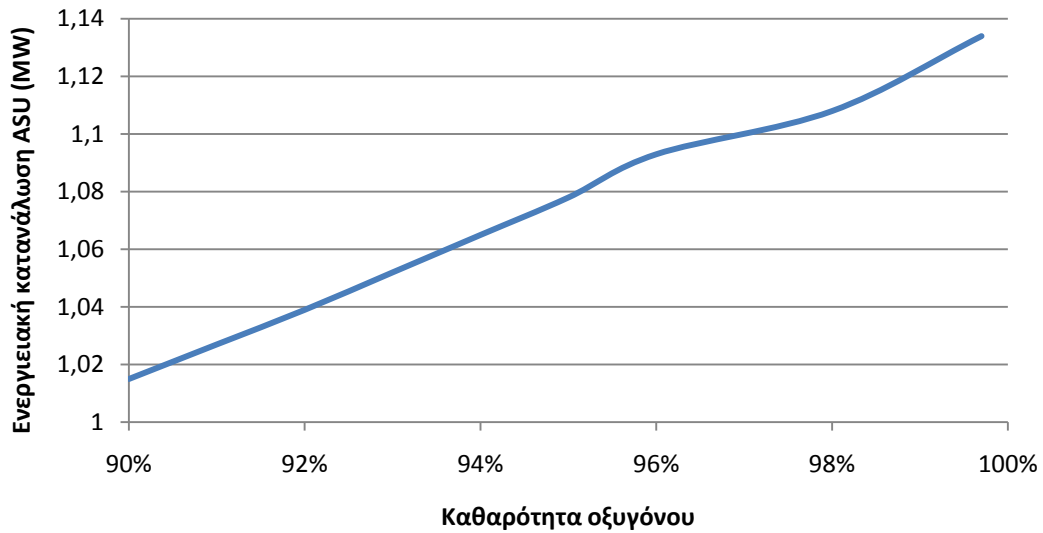
Πίνακας 10.2.2. Πίεση παραγόμενου οξυγόμενου από την ASU συναρτήσει της επιθυμητής καθαρότητάς του

Καθαρότητα οξυγόνου	Πίεση οξυγόνου (bar)
90%	1,27
91%	1,29
92%	1,3
93%	1,32
94%	1,33
95%	1,35
96%	1,4
98%	1,5
99,7%	1,53

Επομένως, αυξανόμενης της καθαρότητας του παραγόμενου οξυγόνου, έχουμε και αύξηση της πίεσης του και κατ' επέκταση και αύξηση της πίεσης στον αεριοποιητή. Άρα η παροχή του οξυγόνου σε αυτό πρέπει να μειώνεται. Αυξανόμενης της πίεσης, αυξάνεται επίσης και η ενεργειακή κατανάλωση της μονάδας διαχωρισμού του αέρα. Ο πίνακας 10.2.3 και το διάγραμμα 10.2.2. παρουσιάζουν αυτή την αύξηση.

Πίνακας 10.2.3 Ενεργειακές απαιτήσεις μονάδας διαχωρισμού του αέρα ανάλογα με την επιθυμητή παραγόμενη καθαρότητα του οξυγόνου

Καθαρότητα οξυγόνου	Ενεργειακή κατανάλωση ASU (MW)
90%	1,015
91%	1,027
92%	1,039
93%	1,052
94%	1,065
95%	1,078
96%	1,093
98%	1,108
99,70%	1,134



Διάγραμμα 10.2.2. Μεταβολή των ενεργειακών απαιτήσεων λειτουργίας της μονάδας διαχωρισμού του αέρα συναρτήσει της απαιτούμενης επιθυμητής καθαρότητας οξυγόνου

Το συνθετικό αέριο που παράγεται στον αεριοποιητή έχει την ίδια σύνθεση σε όλες τις περιπτώσεις και αυτή εξαρτάται από την καθαρότητα του τροφοδοτούμενου τον αεριοποιητή οξυγόνου. Ο παρακάτω πίνακας 10.2.4 παρουσιάζει τη σύνθεση του συνθετικού αερίου, ακριβώς στην έξοδό του από τον αεριοποιητή.

Πίνακας 10.2.4. Κατά μάζα ανάλυση της σύστασης του παραγόμενου από τον αεριοποιητή συνθετικού αερίου, συναρτήσει της καθαρότητας του τροφοδοτούμενου οξυγόνου

Purity	90%	91%	92%	93%	94%	95%	96%	98%	99,7%
AR	1,77%	1,57%	1,38%	1,19%	1,01%	0,83%	0,32%	0,32%	0,05%
CH₄	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
CO	46,88%	46,58%	46,27%	45,97%	45,69%	45,41%	44,64%	44,63%	44,22%
CO₂	9,02%	9,19%	9,36%	9,52%	9,68%	9,83%	10,25%	10,25%	10,47%
H₂	34,37%	34,47%	34,56%	34,63%	34,71%	34,78%	35,01%	34,99%	35,10%
H₂O	7,56%	7,78%	7,99%	8,20%	8,41%	8,61%	9,20%	9,20%	9,52%
N₂	0,27%	0,27%	0,27%	0,27%	0,27%	0,27%	0,27%	0,27%	0,27%
H₂S	0,14%	0,14%	0,17%	0,21%	0,25%	0,28%	0,32%	0,35%	0,39%

Όπως φαίνεται στον πίνακα 10.2.4., το συνθετικό αέριο είναι πλούσιο σε μονοξείδιο του άνθρακα και δευτερευόντως σε διοξείδιο του άνθρακα. Το τρίτο κατά μάζα σύστασης στοιχείο είναι το νερό, με τη μορφή υδρατμών. Τα υπόλοιπα στοιχεία όπως άζωτο, υδρογόνο, αργό και μεθάνιο ενυπάρχουν σε πολύ μικρές ποσότητες.

Άλλο ένα συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι η μικρή έως ελάχιστη μεταβολή των συστατικών του αερίου, αυξανόμενης της καθαρότητας του τροφοδοτούμενου οξυγόνου.

Στη συνέχεια παρατίθεται η σύγκριση των κυκλωμάτων ως προς την ανάκτηση της θερμότητας του παραγόμενου συνθετικού αερίου, μέχρι της θερμοκρασίας τέτοιας ώστε να καταστεί δυνατή η συμπίεσή του.

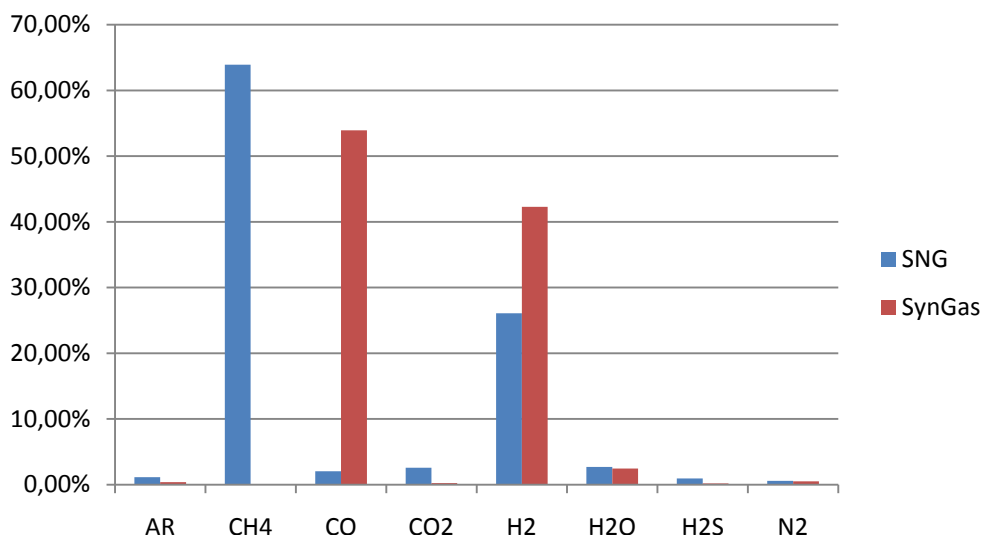
Η βασικότερη σύγκρισή μεταξύ των κυκλωμάτων με παραγωγή και καύση SNG και των κυκλωμάτων που το αέριο καύσιμο είναι το SynGas είναι η σύγκριση της σύστασης των καυσαερίων που παράγονται με την καύση τους στο θάλαμο καύσης του αεριοστροβίλου. Αρχικά, η πρώτη σύγκριση που γίνεται έχει να κάνει με αυτή καθ'αυτή τη σύσταση των αέριων καυσίμων. Έτσι, στους πίνακες 10.2.5 και 10.2.6 παρουσιάζεται του SNG και του SynGas ως καθαρά αέρια καύσιμα. Αντίστοιχα, στο διάγραμμα 10.2.3. παραθέτει συγκριτικά την περιεκτικότητα κάθε στοιχείου στο SynGas και στο SNG αντίστοιχα.

Πίνακας 10.2.5. Σύσταση παραγόμενου SNG για κάθε καθαρότητα οξυγόνου που τροφοδοτεί τον αεριοποιητή

Καθαρότητα οξυγόνου	90%	91%	92%	93%	94%	95%	96%	98%	99,70%
AR	5,79%	5,20%	4,60%	4,01%	3,43%	2,85%	2,28%	1,14%	0,17%
CH₄	59,70%	60,16%	60,53%	60,98%	61,34%	61,79%	62,51%	63,90%	64,61%
CO	2,16%	2,15%	2,14%	2,13%	2,13%	2,12%	2,09%	2,04%	2,03%
CO₂	2,43%	2,45%	2,46%	2,48%	2,50%	2,51%	2,54%	2,59%	2,62%
H₂	25,47%	25,62%	25,83%	25,96%	26,17%	26,29%	26,22%	26,09%	26,33%
H₂O	3,11%	3,07%	3,06%	3,02%	3,01%	2,97%	2,88%	2,71%	2,67%
N₂	0,89%	0,90%	0,90%	0,91%	0,91%	0,92%	0,93%	0,95%	0,96%
H₂S	0,45%	0,46%	0,48%	0,50%	0,52%	0,54%	0,57%	0,59%	0,62%

Πίνακας 10.2.6. Σύσταση παραγόμενου συνθετικού αερίου SynGas για κάθε καθαρότητα τροφοδοτούμενου οξυγόνου στον αεριοποιητή

Καθαρότητα οξυγόνου	90%	91%	92%	93%	94%	95%	96%	98%	99,70%
AR	2,05%	1,83%	1,62%	1,40%	1,19%	0,99%	0,78%	0,39%	0,06%
CH₄	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
CO	54,48%	54,40%	54,30%	54,22%	54,12%	54,04%	54,00%	53,93%	53,81%
CO₂	0,21%	0,21%	0,22%	0,22%	0,23%	0,23%	0,24%	0,25%	0,25%
H₂	39,94%	40,26%	40,55%	40,84%	41,12%	41,39%	41,69%	42,28%	42,71%
H₂O	2,87%	2,83%	2,81%	2,77%	2,76%	2,72%	2,62%	2,45%	2,41%
N₂	0,20%	0,20%	0,20%	0,20%	0,20%	0,20%	0,20%	0,20%	0,20%
H₂S	0,26%	0,26%	0,30%	0,34%	0,38%	0,42%	0,46%	0,51%	0,55%



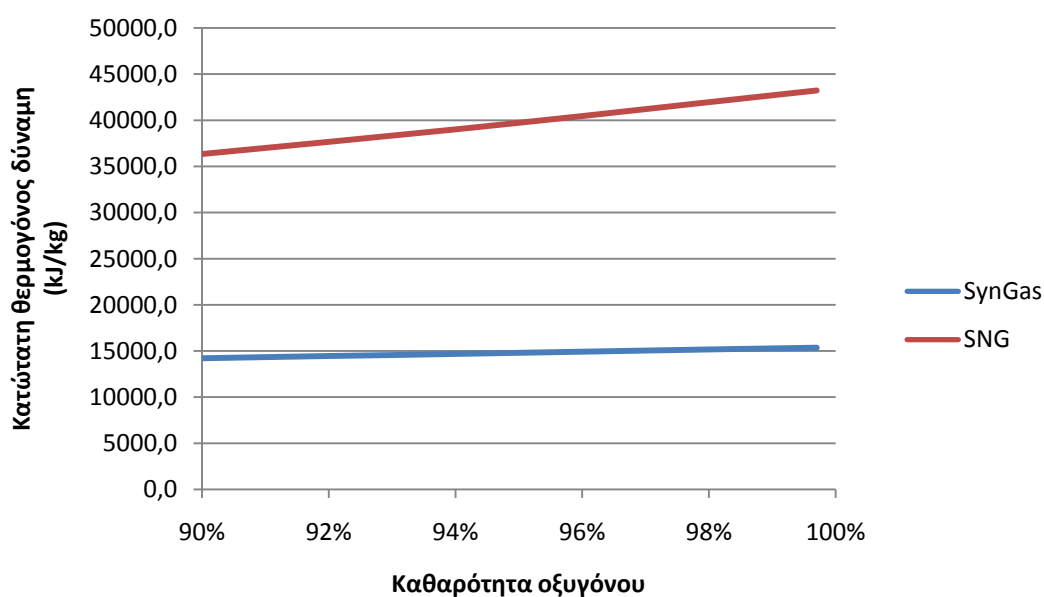
Διάγραμμα 10.2.3. Σύγκριση περιεκτικότητας κάθε στοιχείου μεταξύ SNG και SynGas για καθαρότητα οξυγόνου 98%.

Συγκρίνοντας τους δύο πίνακες και το διάγραμμα, η βασική διαφορά τους παρουσιάζεται στην ποσότητα (% v/v) του μεθανίου και του μονοξειδίου του άνθρακα. Στο SNG το μεθάνιο είναι το κύριο συστατικό του σε ποσοστό από 59% έως 64%, και κατά δεύτερο σε περιεκτικότητα συστατικό είναι το υδρογόνο σε ποσοστό 25% - 26% , ανάλογα με την καθαρότητα του οξυγόνου που τροφοδοτεί τον αεριοποιητή. Αντιθέτως, στο SynGas, λόγω απουσίας επεξεργασίας του, το μεθάνιο βρίσκεται σε απειροελάχιστη ποσότητα ενώ το μονοξείδιο του άνθρακα ενυπάρχει σε περιεκτικότητα 54% - 55% κατ'όγκο ενώ το δεύτερο κατά περιεκτικότητα στοιχείο είναι το υδρογόνο σε ποσοστό 40% -43%.. Μια δευτερεύουσα παρατήρηση είναι ο βαθμός εξάρτησης της καθαρότητας του οξυγόνου. Έτσι, για την παραγωγή του SNG, η καθαρότητα του οξυγόνου είναι καθοριστική, αφού η διαφορά στην περιεκτικότητα του μεθανίου σε αυτό φτάνει το 5%. Αντιθέτως, μεταβαλλόμενης της καθαρότητας του οξυγόνου, δεν παρατηρείται ιδιαίτερη μεταβολή στα στοιχεία του συνθετικού αερίου. Επομένως, συμπεραίνεται ότι σε μονάδες όπου το συνθετικό αέριο είναι το επιθυμητό προϊόν, μια μονάδα διαχωρισμού του αέρα δεν χρειάζεται να φτάνει σε πολύ υψηλά επίπεδα καθαρότητας, αφού οι ενεργειακές απώλειες είναι δυσανάλογες της προσφοράς της στο παραγόμενο αέριο. Αντιθέτως, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο σε μονάδες όπου το επιθυμητό προϊόν είναι το SNG.

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο σύγκρισης των δύο αυτών παραγόμενων αερίων είναι η θερμογόνος ικανότητά τους και κατ' επέκταση η προσδόσιμη ενέργειά τους. Στον πίνακα 10.2.7. και στα διάγραμμα 10.2.4. παρουσιάζεται η μεταβολή της κατώτερης θερμογόνου ικανότητας του ανάλογα με την καθαρότητα του παραγόμενου οξυγόνου που τροφοδοτείται στον αεριοποιητή.

Πίνακας 10.2.7. Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα αερίων καυσίμων συνθετικού αερίου και SNG αντίστοιχα ανάλογα με την καθαρότητα του οξυγόνου στον αεριοποιητή

Καθαρότητα οξυγόνου	SynGas LHV (kJ/ kg)	SNG LHV (kJ/kg)
90%	14217,0	36345,0
91%	14336,1	37005,6
92%	14450,9	37665,5
93%	14568,3	38344,8
94%	14681,5	39023,8
95%	14797,3	39722,7
96%	14921,9	40461,3
98%	15166,6	41965,5
99,70%	15355,7	43228,4



Διάγραμμα 10.2.4. Συγκριτική μεταβολή της κατωτέρας θερμογόνου δύναμης του SynGas και του SNG για κάθε τιμή καθαρότητας οξυγόνου στον αεριοποιητή.

Από τους παραπάνω πίνακες κυρίως παρατηρείται η μεγάλη διαφορά στη θερμογόνο δύναμη των αερίων. Το συνθετικό αέριο έχει πολύ μικρότερη θερμογόνο δύναμη από το SNG και μάλιστα με αισθητή διαφορά, αφού η LHV του SNG αγγίζει ακόμα και τα 42000 kJ/kg περίπου συγκριτικά με τη LHV του SynGas που περιορίζεται στα 15500 kJ/kg περίπου. Μάλιστα είναι φανερό και μέσα από αυτή τη σύγκριση πόσο σημαντική είναι η καθαρότητα του οξυγόνου στις μονάδες παραγωγής και καύσης SNG εν αντιθέσει με τις αντίστοιχες με SynGas.

Αντιστοίχως με τη διαφοροποίηση στη σύνθεση του αερίου καυσίμου, υπάρχει διαφοροποίηση και στο παραγόμενη καυσαέριο από τον αεριοστρόβιλο. Οι πίνακες 10.2.8 και 10.2.9 παρουσιάζουν την κατ'όγκο σύσταση του καυσαερίου που έχει προκύψει από καύση SNG και SynGas αντίστοιχα, πάντα σε συνάρτηση της καθαρότητας του οξυγόνου:

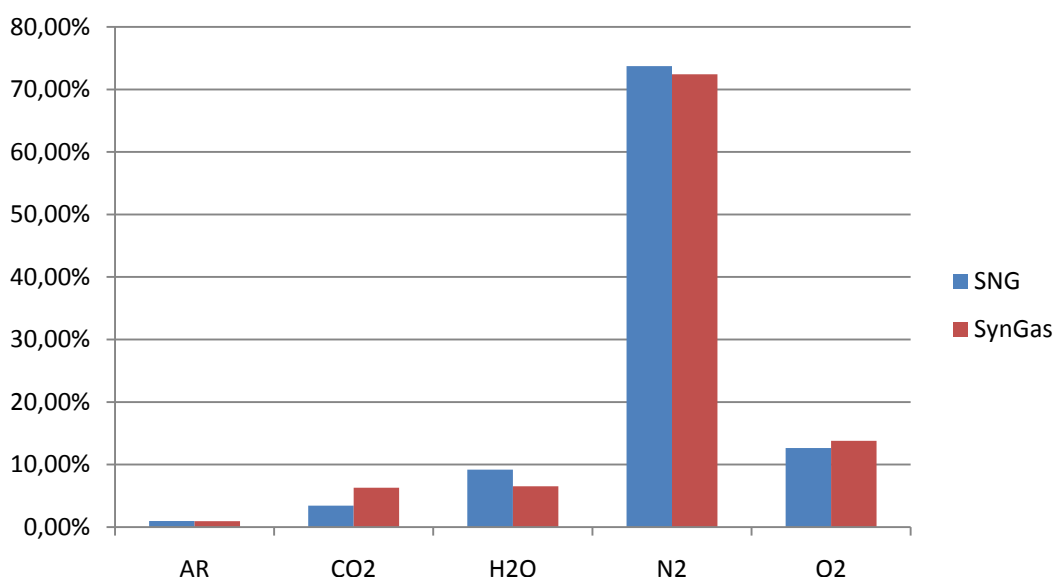
Πίνακας 10.2.8. Σύσταση καυσαερίου από καύση SNG στον αεριοστρόβιλο του συνδυασμένου κύκλου

Καθαρότητα οξυγόνου	90%	91%	92%	93%	94%	95%	96%	98%	99,70%
AR	1,22%	1,19%	1,16%	1,12%	1,09%	1,06%	1,03%	0,97%	0,93%
CO₂	3,42%	3,42%	3,42%	3,42%	3,42%	3,42%	3,42%	3,43%	3,43%
H₂O	9,23%	9,23%	9,23%	9,23%	9,23%	9,23%	9,22%	9,20%	9,20%
N₂	73,51%	73,54%	73,57%	73,60%	73,62%	73,65%	73,68%	73,74%	73,78%
O₂	12,59%	12,60%	12,60%	12,61%	12,62%	12,62%	12,63%	12,64%	12,65%
SO₂	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%

Πίνακας 10.2.9. Σύσταση καυσαερίου από καύση συνθετικού στον αεριοστρόβιλο του συνδυασμένου κύκλου

Καθαρότητα οξυγόνου	90%	91%	92%	93%	94%	95%	96%	98%	99,70%
AR	1,14%	1,11%	1,09%	1,06%	1,04%	1,02%	0,99%	0,95%	0,91%
CO₂	6,46%	6,44%	6,41%	6,39%	6,37%	6,35%	6,33%	6,29%	6,26%
H₂O	6,39%	6,41%	6,44%	6,46%	6,48%	6,50%	6,51%	6,53%	6,57%
N₂	72,23%	72,25%	72,27%	72,29%	72,31%	72,33%	72,36%	72,41%	72,44%
O₂	13,76%	13,77%	13,77%	13,78%	13,78%	13,78%	13,79%	13,80%	13,81%
SO₂	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%

Μια συγκριτική θεώρηση μπορεί να επιτευχθεί με το Διάγραμμα 10.2.5 στο οποίο απεικονίζονται τα στοιχεία του παραγόμενου καυσαερίου για καύση SNG και SynGas αντίστοιχα, για τιμή καθαρότητας οξυγόνου 98%.

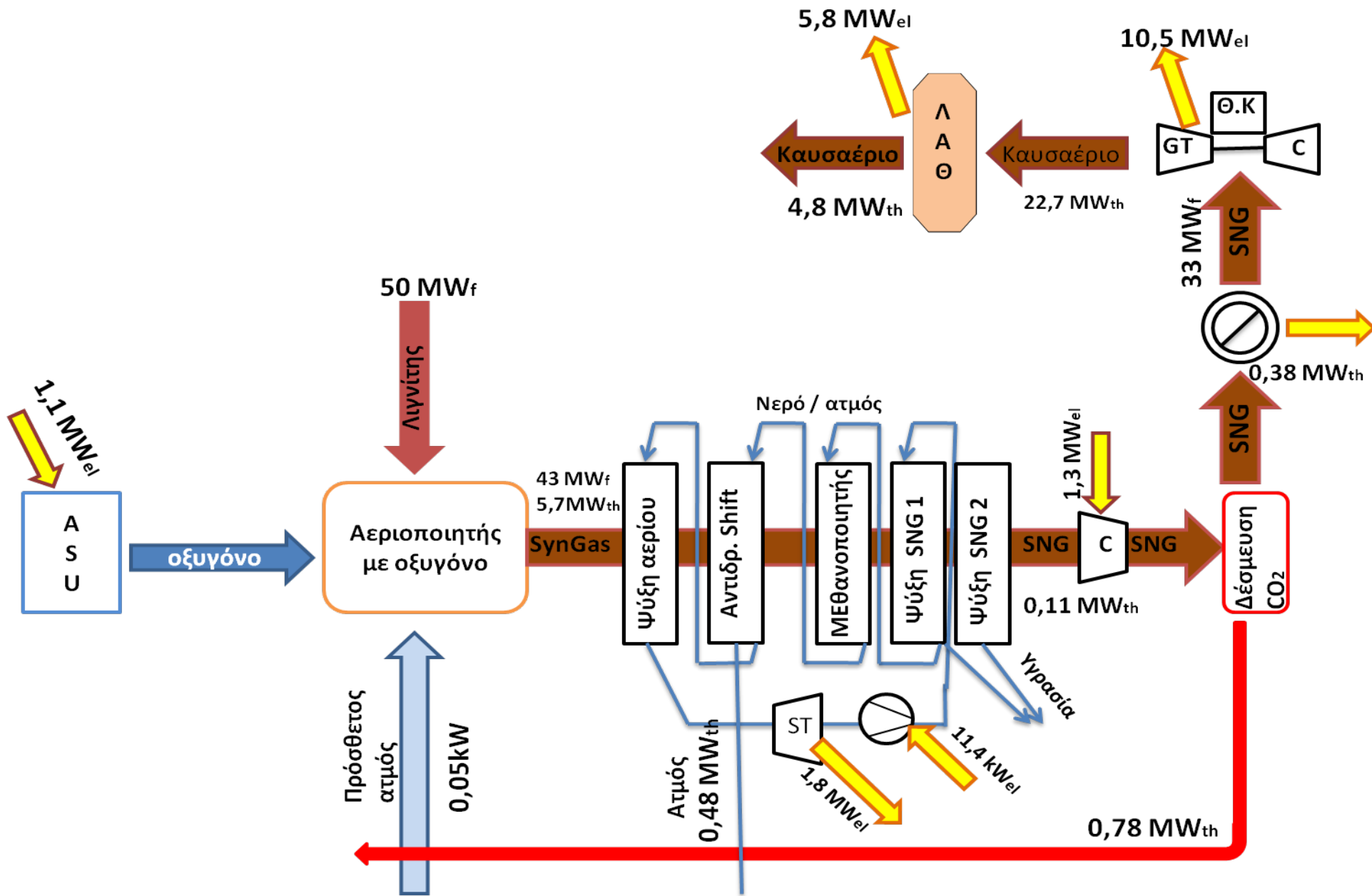


Διάγραμμα 10.2.5. Σύγκριση ποσοστιαίας περιεκτικότητας κατ' όγκο των στοιχείων του καυσαερίου από SNG και SynGas αντίστοιχα, για καθαρότητα οξυγόνου 98%

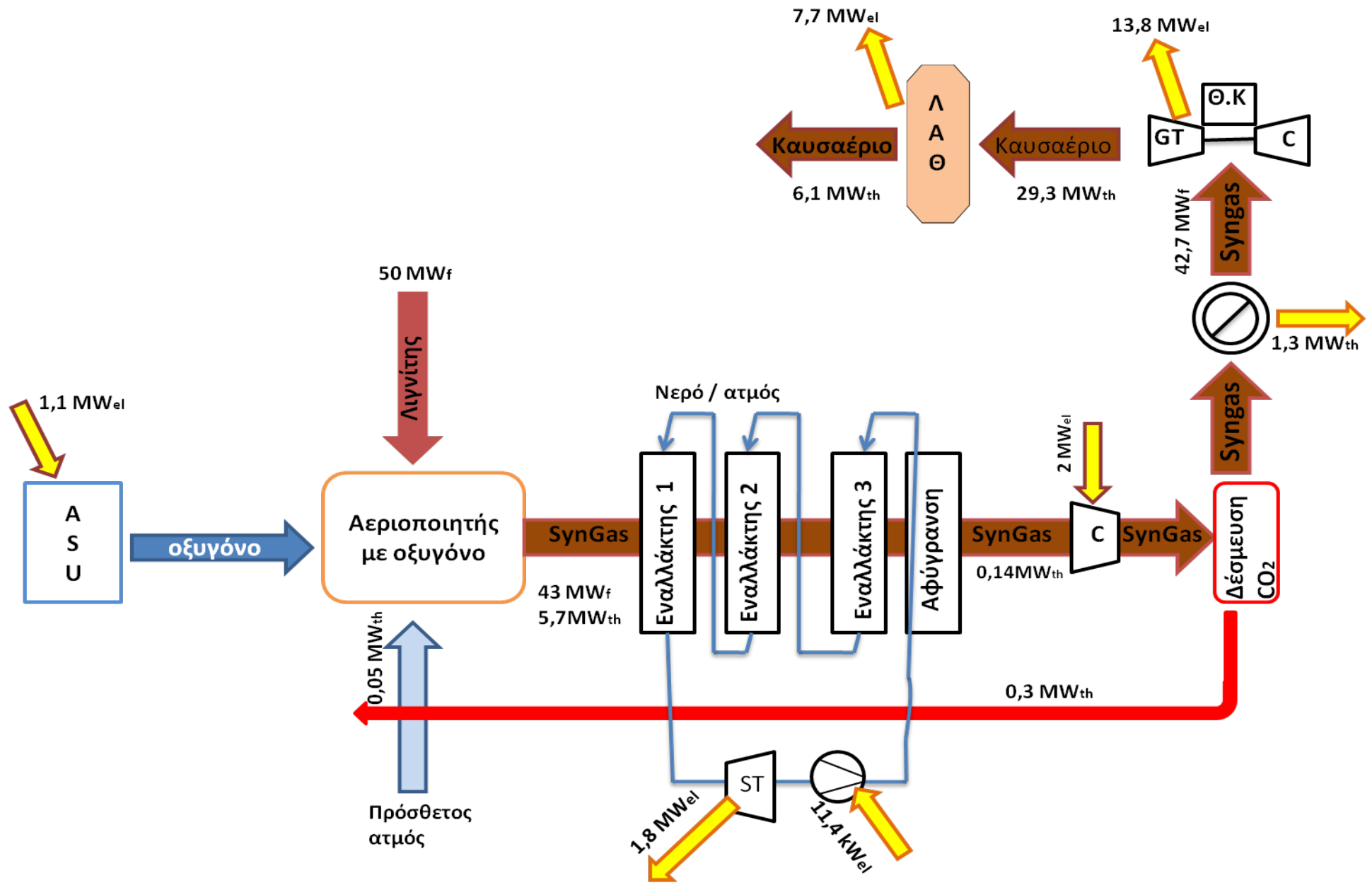
Παρατηρούμε ότι παρά την προφανή διαφορά στη σύσταση των δύο αερίων καυσίμων, τα καυσαέρια που παράγονται από την καύση τους δεν είναι πολύ διαφορετικής σύστασης. Οι μόνες μικρές διαφορές εντοπίζονται στην ποσότητα του αζώτου και του διοξειδίου του άνθρακα, όπου στα καυσαέρια του SNG το άζωτο είναι περισσότερο κατά 1% - 2% κ.ο. ενώ το διοξείδιο του άνθρακα 3% λιγότερο από από ότι στα καυσαέρια του SynGas.

Τελευταίο και σημαντικότερο στοιχείο σύγκρισης είναι οι βαθμοί απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου αρχικά και κατά δεύτερο και σημαντικότερο ο συνολικός βαθμός απόδοσης όλης της μονάδας.

Η ενεργειακή σύγκριση θα γίνει μεταξύ των δύο αποδοτικότερων μονάδων με μεθανοποίηση και χωρίς μεθανοποίηση αντίστοιχα. Αυτές είναι η μονάδα της A4 διπλού τυμπάνου, με μεθανοποίηση και η B5 διπλού τυμπάνου, της κατηγορίας χωρίς μεθανοποίηση. Η καθαρότητα του τροφοδοτούμενου οξυγόνου στον αεριοποιητή είναι 98%. Οι εικόνες 10.1 και 10.2 απεικονίζουν η ροή ενέργειας για κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις που εξετάζονται.



Εικόνα 10.1. Σχηματική περιγραφή ροής ενέργειας στο βέλτιστο κύκλωμα με μεθανοποίηση του αερίου



Εικόνα 10.2. Σχηματική απεικόνιση ροής ενέργειας για το βέλτιστο κύκλωμα χωρίς μεθανοποίηση του αερίου

Όπως γίνεται φανερό από μια πρώτη ματιά στις εικόνες, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στο δευτερεύον κύκλωμα νερού/ατμού της μονάδας με μεθανοποίηση είναι σημαντικά περισσότερη από την ηλεκτρική ενέργεια στο αντίστοιχο κύκλωμα νερού/ατμού της μονάδας χωρίς μεθανοποίηση. Επίσης η ηλεκτρική κατανάλωση για συμπίεση του SNG είναι μικρότερη της αντίστοιχης για συμπίεση του SynGas.

Η σημαντική διαφοροποίηση των δύο μονάδων έγκειται στο τμήμα του συνδυασμένου κύκλου της κάθε μίας. Τα ηλεκτρικά MW που παραγόνται στη μονάδα με καύση SynGas είναι σημαντικά περισσότερα από τα MW με καύση του SNG, είτε απ'ευθείας από τον αεριοστρόβιλο, είτε μέσω του Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας διπλού τυμπάνου. Στην περίπτωση SNG η εκτόνωση στην τουρμπίνα του αεριοστροβίλου αποφέρει 10,5 MW ενώ στην περίπτωση του SynGas 13,8 MW. Επίσης, η θερμική ενέργεια του καυσαερίου στην περίπτωση του SNG είναι μικρότερη από αυτή στην περίπτωση του SynGas με αποτέλεσμα τη διαφορά στην ποσότητα της ηλεκτροπαραγωγής και στον αμοστρόβιλο. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 11.2.10.

Πίνακας 11.2.10 Ενεργειακά αποτελέσματα για τη μονάδα SNG και SynGas αντίστοιχα για καθαρότητα οξυγόνου 98%.

	Μονάδα SNG	Μονάδα SynGas
Ενεργειακές ανάγκες ASU (MW)	1182,5	1182,5
Θερμική ενέργεια παραγόμενου SynGas (MW)	5,7	5,7
Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο δευτερεύον κύκλωμα νερού/ατμού (MW)	3,6	1,8
Ενεργειακή κατανάλωση αεριοσυμπιεστή (MW)	1,3	2
Ενέργεια αέριου καυσίμου (MW_f)	32,85	42,73
Κατώτερη θερμογόνος δύναμη (kJ/kg)	41965,5	15166,6
Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στον αεριοστρόβιλο (MW)	10,5	13,7
Θερμική ενέργεια καυσαερίων στην είσοδο του ΛΑΘ (MW)	22,7	29,3
Θερμική ενέργειας καυσαερίων στην έξοδο του ΛΑΘ (MW)	4,8	6,1
Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στον ατμοστρόβιλο (MW)	5,8	7,7
Ηλεκτρικός β.α. Συνδυασμένου κύκλου	49,20%	49,55%
Ηλεκτρικός β.α. μονάδας	34,6%	39,6%

Από τα συγκριτικά αποτελέσματα του πίνακα, εξάγεται το γενικότερο συμπέρασμα για τις μονάδες SNG και SynGas. Η παραγωγή και καύση του συνθετικού αερίου είναι προτιμότερη σε μια ηλεκτροπαραγωγική μονάδα, σε σχέση με μια μονάδα που έχει εγκαταστήσει σύστημα μεθανοποίησης, αφού ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της μονάδας SynGas είναι κατά 5 ποσοστιαίες μονάδες μεγαλύτερος. Αντιθέτως, λόγω της υψηλής θερμογόνου ικανότητας του SNG, οι αντίστοιχες μονάδες ενδείκνυνται για παραγωγή φυσικού αερίου ως προϊόν προς πώληση, χωρίς να προβλέπεται ιδιοκατανάλωσή του.

Συμπεράσματα – Προτάσεις

Στη διπλωματική αυτή εργασία προσομοιώθηκαν και μελετήθηκαν οι ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες συνδυασμένου κύκλου με καύση συνθετικού αερίου και συνθετικού φυσικού αερίου, ως προϊόν αεριοποίησης λιγνίτη με οξυγόνο (IGCC).

Για τον σκοπό αυτό καταστάθηκε βασική η γνώση των βασικών αρχών λειτουργίας μιας μονάδας διαχωρισμού του αέρα, βάσει των οποίων πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση της μονάδας στο MDK του IPSE-Pro™. Η βασική μέθοδος διαχωρισμού του αέρα είναι η κρυογενής, δηλαδή η μέθοδος που πραγματοποιείται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και συγκεκριμένα σε θερμοκρασίες κοντά στη θερμοκρασία τήξεως του αέρα, τους -185°C . Τα κύρια στάδια της μεθόδου είναι το φιλτράρισμα του αέρα, ώστε να μην εισέρχονται ανεπιθύμητα σωματίδια στη μονάδα, η συμπίεση του αέρα σε στάδια, με ενδιάμεση ψύξη του, η ψύξη του αέρα μέχρι τη φάση της υγροποίησής του και τέλος η απόσταξη των στοιχείων του στη στήλη διαχωρισμού. Η ενεργειακή κατανάλωση της μονάδας αφορά την ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για το στάδιο των συμπίεσεων και συνδέεται άρρηκτα με το ποσοστό καθαρότητας του οξυγόνου που επιθυμείται να παραχθεί και είναι ανάλογη αυτής. Για παράδειγμα οι ενεργειακές απαιτήσεις για παραγωγή οξυγόνου 90% σε καθαρότητα είναι κατά 10% μικρότερες από αυτές για παραγωγή οξυγόνου 99,7% καθαρότητας.

Το οξυγόνο πλέον αποτελεί το μέσο αεριοποίησης του λιγνίτη στον αντιδραστήρα της αεριοποίησης. Αεριοποίηση είναι η θερμοχημική διαδικασία που μετατρέπει ανθρακούχα υλικά, όπως γαιάνθρακα, πετρέλαιο, βιοκαύσιμα ή βιομάζα, σε μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο (κατά κύριο λόγο), πραγματοποιώντας χημική αντίδραση ορυκτών υλών σε υψηλές θερμοκρασίες με ελεγχόμενη ποσότητα οξυγόνου ή/και ατμού. Το αέριο μίγμα που προκύπτει λέγεται «συνθετικό αέριο» και αποτελεί και το ίδιο καύσιμο αέριο. Η αεριοποίηση είναι μια μέθοδος για παραγωγή ενέργειας από διαφόρων ειδών οργανικά υλικά. Το πλεονέκτημα της αεριοποίησης είναι ότι η χρήση του συνθετικού αερίου είναι ενδεχομένως πιο αποδοτική απ' ότι απευθείας καύση του καυσίμου, γιατί αυτό μπορεί να καεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες αλλά ακόμα και σε κυψέλες καυσίμου, έτσι ώστε το ανώτερο

θερμοδυναμικό όριο για την απόδοση, όπως ορίζεται στο νόμο του Carnot, να' ναι μεγαλύτερο ή μη εφαρμόσιμο. Το συνθετικό αέριο μπορεί να καεί απευθείας σε Μηχανές Εσωτερικής Καύσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή μεθανόλης και υδρογόνου ή να μετατραπεί μέσω της μεθόδου Fischer – Topsch σε συνθετικό καύσιμο. Η αεριοποίηση μπορεί επίσης να γίνει με υλικά που δεν είναι εκ των προτέρων χρήσιμα ως καύσιμα, όπως βιομάζα ή οργανικά κατάλοιπα. Επιπλέον, η καύση σε υψηλή θερμοκρασία διυλίζει διαβρωτικά στοιχεία, όπως χλώριο και κάλιο, επιτρέποντας την παραγωγή καθαρού αερίου από «προβληματικά» καύσιμα υλικά. Ο αεριοποιητής λειτουργεί υποστοιχειομετρικά με λόγο 0,4 και η αεριοποίηση πραγματοποιείται στη θερμοκρασία των 850°C. Περιλαμβάνει το στάδιο της πυρόλυσης, τη καύσης και της αεριοποίησης.

Στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η αντίδραση της μετατόπισης νερού-αερίου (water-gas shift reaction). Κατά την αντίδραση αυτή, τα μόρια του H₂O και του μονοξειδίου του άνθρακα αντιδρούν και σχηματίζουν διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται ο λόγος H₂/CO στο αέριο. Η αντίδραση είναι εξώθερμη και ευνοείται σε ολοένα χαμηλότερες θερμοκρασίες. Για το λόγο αυτό, το συνθετικό αέριο που παράγεται στον αεριοποιητή ψύχεται από τους 850°C στους 400°C μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας ή ενός στοιχείου απορρόφησης θερμότητας. Ο αντιδραστήρας μετατόπισης είναι απαραίτητος για να δημιουργηθούν οι απαραίτητες συνθήκες και προϋποθέσεις για να γίνει αποτελεσματικά η μεθανοποίηση. Για την αποφυγή ανάπτυξης στερεού άνθρακα εντός του αντιδραστήρα, χρησιμοποιείται καταλύτης νικελίου καθώς και ο λόγος $\frac{H_2}{CO}$ να' ναι μεγαλύτερος του 3. Από το διάγραμμα C-H-O υπολογίζονται οι δέουσες αναλογίες ατόμων άνθρακα, υδρογόνου και οξυγόνου σε ισορροπία σε διάφορες θερμοκρασίες στο αέριο σύνθεσης, ώστε να μην πραγματοποιείται σχηματισμός στερεού άνθρακα.

Η μεθανοποίηση είναι η καρδιά του συστήματος παραγωγής συνθετικού φυσικού αερίου. Ορίζεται γενικά ως η καταλυτική αντίδραση του υδρογόνου με μονοξείδιο ή και διοξείδιο του άνθρακα, σχηματίζοντας μεθάνιο και νερό, σύμφωνα με τις αρχές της μεθανοποίησης. Η αντίδραση αυτή είναι έντονα εξώθερμη και η χαμηλή θερμοκρασία ευνοεί την παραγωγή αερίου με μεγάλη περιεκτικότητα σε μεθάνιο. Για την απομάκρυνση των οξειδίων του άνθρακα που υπάρχουν στο

συνθετικό αέριο χρησιμοποιούνται καταλύτες με περιεκτικότητα σε νικέλιο μικρότερης του 15% κ.β.

Το τελευταίο στάδιο της διαχείρισης του αερίου είναι η αυτό της δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα από αυτό. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε είναι η MDEA (Methyl di-ethanol amine). Είναι υδατική μέθοδος και χρησιμοποιείται για χημική απορρόφηση του διοξειδίου του άνθρακα, ειδικότερα στις τεχνολογίες δέσμευσης πριν από την καύση. Το σύστημα αυτό είναι μείζονος σημασίας, γιατί απαλλάσσει το αέριο από το βασικότερο αέριο του θερμοκηπίου, το CO₂. Το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως σε πετροχημικές βιομηχανίες.

Έχοντας ολοκληρώσει τη διαχείριση του παραγόμενου αερίου από τον αεριοποιητή, το συνθετικό αέριο ή το συνθετικό φυσικό αέριο αποτελούν πλέον το καθαρό αέριο καύσιμο σε μια ηλεκτροπαραγωγική μονάδα συνδυασμένου κύκλου.

Στην παρούσα εργασία, ιδιαίτερη έμφαση και σημασία δόθηκε στην εκμετάλλευση της θερμότητας που παράγεται από τις εξώθερμες αντιδράσεις σχηματισμού του συνθετικού φυσικού αερίου καθώς και του συστήματος ψύξης του, όπως επίσης και του συστήματος ψύξης του συνθετικού αερίου που παράγεται απ'ευθείας στον αεριοποιητή. Η εκμετάλλευση της θερμότητας αυτή γίνεται με την εφαρμογή κύκλων νερού-ατμού για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, πρόσθετης αυτής από τη χρήση του συνδυασμένου κύκλου. Αυτή η εφαρμογή αυξάνει τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης της μονάδας και την καθιστά ιδιαίτερα προσοδοφόρα, δεδομένης και της απουσίας CO₂ και NO_x στο καυσαέριο, ρύπων που φορολογούνται.

Μέσα από αυτή τη μελέτη, πραγματοποιήθηκε και μια δεύτερη και βασικότερη σύγκριση. Αυτής των μονάδων με προσθήκη μεθανοποίησης του συνθετικού αερίου και αυτών χωρίς μεθανοποίηση και καύση του παραγόμενου συνθετικού αερίου από τον αεριοποιητή. Το βασικότερο συμπέρασμα που εξάγεται από αυτή τη σύγκριση είναι ότι η μονάδα με μεθανοποίηση έχει χαμηλότερο ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης απ'ότι αυτή χωρίς. Επίσης, η μονάδα SNG είναι πιο σύνθετη δομικά, μιας και προστίθενται στοιχεία όπως ο αντιδραστήρας μετατόπισης

και ο αντιδραστήρας μεθανοποίησης. Αυτό λοιπόν οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είναι για μονάδες IGCC με κύριο στόχο την ηλεκτροπαραγωγή, είναι προτιμότερη και πιο αποδοτική η απλή καύση του συνθετικού αερίου, χωρίς μεθανοποίηση. Αντιθέτως, τα συστήματα διαχείρισης και παραγωγής συνθετικού φυσικού αερίου (SNG) είναι προτιμότερα για παραγωγή του SNG και πώλησή του ως κύριο προϊόν παραγωγής.

Ως συνέχεια της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να αποτελέσει η χρηματοοικονομική μελέτη και σύγκριση των μονάδων που μελετήθηκαν ενεργειακά. Το κόστος κατασκευής των αντιδραστήρων, το κέρδος που δύναται να προκύψει από πώληση του SNG καθώς και από την εξάλειψη των οικονομικά και περιβαλλοντικά ζημιωγόνων αέριων ρύπων. Επίσης, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ των μονάδων IGCC που ως μέσο αεριοποίησης χρησιμοποιείται ο ατμός και το οξυγόνο αντίστοιχα.

Βιβλιογραφία

[1] Δ. Μαθιουλάκη, παν/μιακές σημειώσεις μαθήματος «Βιομηχανική Ρευστομηχανική» ΕΜΠ .

[2] Energy Statics Division,International Energy Agency (IEA) – Key World Energy Statistics 2009 .

[3] Jan Kopyscinski, Tilman J. Schildhauer, Serge M. A. Biollaz, “Production of synthetic natural gas (SNG) from coal and dry biomass – A technology review from 1950 to 2009”, Fuel, Volume 89, Issue 8, August 2010, Pages 1763-1783, Elsevier 2010.

[4] J,Gale, K.J. Damen and A.F. Wildenborg, “Worldwide selection of early opportunities for O₂-enhanced oil recovery and CO₂-enhanced coal bed methane production”, Energy Vol. 29,Issues 9-10,July-August 2004, Pages 1611-1621, 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies.

[5] Developments in air separation, R.M. Thorogood, Air Products and chemicals Inc, Gas Separation and Purification 1991, Vol5, June

[6] Klas Andersson, Peter Maksinen, Master Thesis Report T2002-258, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden 2002.

[7] Linde AG. Cryogenic Air Separation, History and Technological Progress.

[8] REI (Renewable Energy Institute),Texas USA

<http://cogeneration.net/coal-gasification-2>

- [9] US Department of Energy
<http://fossil.energy.gov/programs/powersystems/gasification/howgasificationworks.html>
- [10] BRIDGEWATER, A .V., The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation, Fuel 74 (5) (1995)
- [11] ΠΑΝΟΥΣΗΣ Γ., “ Συμπαγωγικά συστήματα αξιοποίησης παραγόμενου αερίου από στερεό δευτερογενές καύσιμο”, Διπλωματική Εργασία, 2009, ΕΜΠ
- [12] BRAM VAN DER DRIFT, “Gasification for 2nd generation fuels”, ECN
- [13] Claverton Energy Research Group, <http://www.claverton-energy.com/integrated-gasification-combined-cycle-for-carbon-capture-storage.html>
- [14] “A comparative modelling evaluation of Synthetic Natural Gas production from coal-lignite steam & oxygen gasification process”, S.Karellas, K.D. Panopoulos, G. Panousis, A. Rigas, J. Karl, E. Kakaras
- [15] Combustion Gasification & Propulsion Laboratory, Dept of Aerospace Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, India, 2010 CGLP
- [16] Wikipedia
(http://en.wikipedia.org/wiki/File:Natural_gas_production_world.PNG)
- [17] Centrex Europe Energy and Gas AG
(<http://www.centrex.at/en/market.asp?ldInfo=1>)
- [18] INOGATE (INterstate Oil and GAS Transportation to Europe)
<http://www.inogate.org/>
- [19] Wikipedia (http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_natural_gas_pipelines)

[20] US. Department of Energy – National Energy Technology Laboratory

[21] Enerstar® (<http://www.enerstar.com/images/WabashRiverGeneration.jpg>)

[22] Φάκωνα Αφροδίτη, «Ολοκληρωμένα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής με συνθετικό φυσικό αέριο από αλλοθερμική αεριοποίηση γαιάνθρακα»,
Διπλωματική Εργασία 2010

[23] James A. Dumesic, University of Wisconsin, Department of chemical and biological engineering

(http://jamesadumesic.che.wisc.edu/facilitypics/WGS_rig.jpg)

[24] Wolf-Dieter Muller, Lurgi, Frankfurt am Main, Germany, “Gas Production”,
Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry, 15 DEC 2006,
DOI: 10.1002/14356007.a12_169.pub2

Παράρτημα 1. Μοντελοποίηση ASU στο MDK του IPSE-Pro™

```
f1:   feed.mass = drain_1.mass+drain_2.mass;
f2:   feed.p = 1.013;
f3:   drain_1.p = drain_2.p;
fa:   Oxygen_Enthalpy = 0.902430*Temp_Oxygen+0.361332*10^(-
3)*Temp_Oxygen^2 - 0.164362*10^(-6)*Temp_Oxygen^3 + 0.216244*10^(-
10)*Temp_Oxygen^4 + 0.354211*10^(-14)*Temp_Oxygen^5;
fb:   Nitrogen_Enthalpy = 0.103693*10*Temp_Nitrogen+0.278472*10^(-
4)*Temp_Nitrogen^2+0.392958*10^(-6)*Temp_Nitrogen^3-0.313739*10^(-
9)*Temp_Nitrogen^4+0.702044*10^(-13)*Temp_Nitrogen^5;
f11:  drain_1.t = Temp_Nitrogen-273;
f12:  drain_2.t = Temp_Oxygen-273;
f13:  drain_1.Composition.N2 = 1;
f4:   if Purity==90 then
      drain_2.p = 1.27;
      else
      if Purity==91 then
      drain_2.p = 1.29;
      else
      if Purity==92 then
      drain_2.p = 1.3;
      else
      if Purity==93 then
      drain_2.p = 1.32;
      else
      if Purity==94 then
      drain_2.p = 1.33;
      else
      if Purity==95 then
      drain_2.p = 1.35;
      else
      if Purity==96 then
```

```

drain_2.p = 1.4;
else
if Purity==98 then
drain_2.p = 1.5;
else
if Purity== 99.7 then
drain_2.p = 1.53;
else
drain_2.p = 0;
f5:  if Purity==90 then
drain_2.mass = [(feed.mass *
2817.794195/(4.855*0.984))/2554.36]+[(feed.mass *
2817.794195/(4.855*0.984))/2554.36]*0.1/0.9;
else
if Purity==91 then
drain_2.mass = [(feed.mass *
2817.794195/(4.855*0.984))/2554.36]+[(feed.mass *
2817.794195/(4.855*0.984))/2554.36]*0.09/0.91;
else
if Purity==92 then
drain_2.mass = [(feed.mass *
2817.794195/(4.855*0.984))/2554.36]+[(feed.mass *
2817.794195/(4.855*0.984))/2554.36]*0.08/0.92;
else
if Purity==93 then
drain_2.mass = [(feed.mass *
2817.794195/(4.855*0.984))/2554.36]+[(feed.mass *
2817.794195/(4.855*0.984))/2554.36]*0.07/0.93;
else
if Purity==94 then
drain_2.mass = [(feed.mass *
2817.794195/(4.855*0.984))/2554.36]+[(feed.mass *
2817.794195/(4.855*0.984))/2554.36]*0.06/0.94;

```

```

else
  if Purity==95 then
    drain_2.mass = [(feed.mass *
2817.794195/(4.855*0.984))/2554.36]+[(feed.mass *
2817.794195/(4.855*0.984))/2554.36]*0.05/0.95;
  else
    if Purity==96 then
      drain_2.mass = [(feed.mass *
2817.794195/(4.855*0.986))/2554.36]+[(feed.mass *
2817.794195/(4.855*0.986))/2554.36]*0.04/0.96;
    else
      if Purity==98 then
        drain_2.mass = [(feed.mass *
2817.794195/(4.855*0.98))/2554.36]+[(feed.mass *
2817.794195/(4.855*0.98))/2554.36]*0.02/0.98;
      else
        if Purity== 99.7 then
          drain_2.mass = [(feed.mass * 2817.794195/4.855)/2554.36]+[(feed.mass *
2817.794195/4.855)/2554.36]*0.003/0.997;
        else
          drain_2.mass = 0;

f6:  if Purity==90 then
      Power_for_compression=Power_Mair_90(eta_s)*feed.mass;
    else
      if Purity==91 then
        Power_for_compression=Power_Mair_91(eta_s)*feed.mass;
      else
        if Purity==92 then
          Power_for_compression=Power_Mair_92(eta_s)*feed.mass;
        else
          if Purity==93 then
            Power_for_compression=Power_Mair_93(eta_s)*feed.mass;

```

```

else
if Purity==94 then
Power_for_compression=Power_Mair_94(eta_s)*feed.mass;
else
if Purity==95 then
Power_for_compression=Power_Mair_95(eta_s)*feed.mass;
else
if Purity==96 then
Power_for_compression=Power_Mair_96(eta_s)*feed.mass;
else
if Purity==98 then
Power_for_compression=Power_Mair_98(eta_s)*feed.mass;
else
if Purity==99.7 then
Power_for_compression=Power_Mair_997(eta_s)*feed.mass;
else
Power_for_compression=0;

```

```

f7: if Purity==90 then
Heating_power=feed.mass*Heating_Mair_90(eta_s);
else
if Purity==91 then
Heating_power = feed.mass*Heating_Mair_91(eta_s);
else
if Purity==92 then
Heating_power = feed.mass*Heating_Mair_92(eta_s);
else
if Purity==93 then
Heating_power = feed.mass*Heating_Mair_93(eta_s);
else
if Purity==94 then
Heating_power = feed.mass*Heating_Mair_94(eta_s);
else

```

```

if Purity==95 then
Heating_power = feed.mass*Heating_Mair_95(eta_s);
else
if Purity==96 then
Heating_power = feed.mass*Heating_Mair_96(eta_s);
else
if Purity==98 then
Heating_power = feed.mass*Heating_Mair_98(eta_s);
else
if Purity== 99.7 then
Heating_power = feed.mass*Heating_Mair_995(eta_s);
else
Heating_power = 0;
f8: if Purity==90 then
Oxygen_Enthalpy = 1811.055-3.3307*Nitrogen_Enthalpy;
else
if Purity==91 then
Oxygen_Enthalpy = 1810.026-3.3307*Nitrogen_Enthalpy;
else
if Purity==92 then
Oxygen_Enthalpy = 1810.839 - 3.3307*Nitrogen_Enthalpy;
else
if Purity==93 then
Oxygen_Enthalpy = 1810.752- 3.3307*Nitrogen_Enthalpy;
else
if Purity==94 then
Oxygen_Enthalpy = 1810.622- 3.3307*Nitrogen_Enthalpy;
else
if Purity==95 then
Oxygen_Enthalpy = 1810.536- 3.3307*Nitrogen_Enthalpy;
else
if Purity==96 then
Oxygen_Enthalpy = 1810.406- 3.3307*Nitrogen_Enthalpy;

```

```

else
if Purity==98 then
Oxygen_Enthalpy = 1810.233 - 3.3307*Nitrogen_Enthalpy;
else
if Purity== 99.7 then
Oxygen_Enthalpy = 1810.189- 3.3307*Nitrogen_Enthalpy;
else
Oxygen_Enthalpy=0;
f9: if Purity==90 then
drain_2.Composition.O2 = 0.90;
else
if Purity==91 then
drain_2.Composition.O2 = 0.91;
else
if Purity==92 then
drain_2.Composition.O2 = 0.92;
else
if Purity==93 then
drain_2.Composition.O2 = 0.93;
else
if Purity==94 then
drain_2.Composition.O2 = 0.94;
else
if Purity==95 then
drain_2.Composition.O2 = 0.95;
else
if Purity==96 then
drain_2.Composition.O2 = 0.96;
else
if Purity==98 then
drain_2.Composition.O2 = 0.98;
else
if Purity== 99.7 then

```



```

drain_2.Composition.O2 = 0.997;
else
drain_2.Composition.O2 = 0;
f10: drain_2.Composition.AR = 1- drain_2.Composition.O2;

f19: if Purity==90 then
Q_water_1 = Heating_power/QQ1_90(eta_s);
else
if Purity==91 then
Q_water_1 =Heating_power/QQ1_91(eta_s);
else
if Purity==92 then
Q_water_1=Heating_power/QQ1_92(eta_s);
else
if Purity == 93 then
Q_water_1=Heating_power/QQ1_93(eta_s);
else
if Purity==94 then
Q_water_1=Heating_power/QQ1_94(eta_s);
else
if Purity==95 then
Q_water_1=Heating_power/QQ1_94(eta_s);
else
if Purity==96 then
Q_water_1=Heating_power/QQ1_96(eta_s);
else
if Purity==98 then
Q_water_1 =Heating_power/QQ1_98(eta_s);
else
if Purity==99.7 then
Q_water_1 = Heating_power/QQ1_997(eta_s);
else
Q_water_1 = 0;

```

```

f20:  Q_water_2=Heating_power-Q_water_1;

f21:  if Purity==90 then
      feed_water_1.mass=Q_water_1/Q1W1_90(eta_s);
      else
      if Purity==91 then
      feed_water_1.mass= Q_water_1 / Q1W1_91(eta_s);
      else
      if Purity==92 then
      feed_water_1.mass=Q_water_1 / Q1W1_92(eta_s);
      else
      if Purity == 93 then
      feed_water_1.mass=Q_water_1 / Q1W1_93(eta_s);
      else
      if Purity==94 then
      feed_water_1.mass=Q_water_1 / Q1W1_94(eta_s);
      else
      if Purity==95 then
      feed_water_1.mass=Q_water_1 / Q1W1_95(eta_s);
      else
      if Purity==96 then
      feed_water_1.mass=Q_water_1 / Q1W1_96(eta_s);
      else
      if Purity==98 then
      feed_water_1.mass=Q_water_1 / Q1W1_98(eta_s);
      else
      if Purity==99.7 then
      feed_water_1.mass=Q_water_1 / Q1W1_997(eta_s);
      else
      feed_water_1.mass =0;

f22:  feed_water_2.mass=Q_water_2/16.74843076;

```

f31: drain_water_1.mass=feed_water_1.mass;

f32: drain_water_2.mass=feed_water_2.mass;

Παράρτημα 2. Μοντελοποίηση αεριοποιητή με οξυγόνο στο MDK του IPSE-Pro™.

Στο μοντέλο του αεριοποιητή γίνονται οι εξής υπολογισμοί :

- Υπολογισμός της θερμότητας σχηματισμού του καυσίμου, μετρούμενη από την κατώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου στους 25° C και βασιζόμενη στην παρακάτω εμπειρική σχέση :

$$H_f - H_U = - \frac{393785.3}{12.011} n_C - \frac{241988.7}{2.0158} n_H - \frac{297040.9}{32.06} n_S - \frac{241988.7}{18.0152} n_W$$

όπου H_{f0} είναι η ενέργεια σχηματισμού του καυσίμου, H_U η θερμογόνος δύναμή του στους 25° C και n_C , n_H , n_S , n_W είναι οι περιεκτικότητες του καυσίμου σε άνθρακα, υδρογόνο, θείο και υγρασία.

- Ενεργειακός ισολογισμός λαμβάνοντας υπόψη και την ενθαλπία σχηματισμού του καυσίμου : $m_f H_f + m_{fg} H_{fg} = q_{trans} + m_{SG} H_{SG}$

όπου m_f : η μάζα του καυσίμου

H_f : ενθαλπία καυσίμου (= $h_f - C p_f \cdot 25 + H_{f0}$)

m_{fg} : η μάζα του αερίου που τροφοδοτείται ο αεριοποιητής

q_{trans} : η θερμικές απώλειες του αεριοποιητή (= $m_f H_f \cdot Q/100$) όπου Q το ποσοστό απωλειών

m_{SG} : μάζα του συνθετικού αερίου που παράγεται (= $m_f + m_O$)

H_{SG} : ενθαλπία συνθετικού αερίου

- Υπολογισμός της θερμογόνου δύναμης του καυσίμου, σύμφωνα με την εξίσωση Boie :

$$HV = 34835 n_C + 93870 n_H + 10465 n_S + 6280 n_N - 10800 n_O - 2440 n_W$$

- Υπολογισμός των συστατικών του συνθετικού αερίου, μέσα από τις χημικές αντιδράσεις που επελέγησαν να εφαρμοστούν στον αεριοποιητή:

$$i) n_{fC} \eta m_f + \left(\frac{12,011}{44,0098} n_{fg/CO_2} \right) m_{fg} = \left(\frac{12,011}{16,0426} n_{sg/CH_4} + \frac{12,011}{28,0104} n_{sg/CO} + \frac{12,011}{44,0098} n_{sg/CO_2} \right) m_{sg}$$

όπου η το ποσοστό μετατροπής του άνθρακα.

$$ii) (n_{fH} + \frac{2,0158}{18,0152} n_{f/W}) m_f + \frac{2,0158}{18,0152} n_{fg/H_2O} m_{fg} = \left(\frac{4,0316}{16,0426} n_{sg/CH_4} + n_{sg/H_2} + \frac{2,0158}{18,0152} \right.$$

$$\left. n_{sg/H_2O} + \frac{2,0158}{34,0758} n_{sg/H_2S} \right) m_{sg}$$

$$iii) (n_{fO} + \frac{15,9994}{18,0152} n_{f/W}) m_f + \left(\frac{15,9994}{18,0152} n_{fg/H_2O} + n_{fg/O_2} + \frac{31,9988}{44,0098} n_{fg/CO_2} \right) m_{fg} =$$

$$\left(\frac{15,9994}{28,0104} n_{sg/CO} + \frac{31,9988}{44,0098} n_{sg/CO_2} + \frac{15,9994}{18,0152} n_{sg/H_2O} \right) m_{sg}$$

$$iv) m_{Ash} = n_{f/Ash} m_f + n_{fC} m_f (1 - \eta)$$

- Υπολογισμός μοριακού βάρους του παραγόμενου συνθετικού αερίου :

$$MG = \frac{n_{sg/AR}}{39,948} + \frac{n_{sg/CH_4}}{16,0426} + \frac{n_{sg/CO}}{28,014} + \frac{n_{sg/CO_2}}{44,0098} + \frac{n_{sg/H_2}}{2,0158} + \frac{n_{sg/H_2O}}{18,0152} + \frac{n_{sg/H_2S}}{34,0758} +$$

$$\frac{n_{sg/N_2}}{28,0134}$$

- Στοιχειομετρική ανάλυση της χημικής αντίδρασης μετατόπισης νερού – αερίου:

$$(10^{K_{SH}(T)} \frac{n_{sg/CO}}{28,0104} \cdot \frac{n_{sg/H_2O}}{18,0152} \cdot \frac{n_{sg/CO_2}}{44,0098} \cdot \frac{n_{sg/H_2}}{2,0158}) 10000 = 0$$

όπου $K_{SH}(T)$ είναι η σταθερά ισορροπίας της αντίδρασης, ανάλογα με τη θερμοκρασία του αερίου και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$\ln(K_{SH}) = \ln K^0 + \frac{\Delta A}{R} \ln \frac{T}{T_0} + \frac{\Delta B}{2R} (T - T_0) + \frac{\Delta C}{6R} (T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta D}{12R} (T^3 - T_0^3)$$

όπου $\ln K^0 = \frac{-\Delta G^0}{R T_0} = -\sum \frac{\nu_i \Delta G_{fi}(T_0)}{R T_0}$ και ΔA , ΔB , ΔC και ΔD υπολογίζονται για

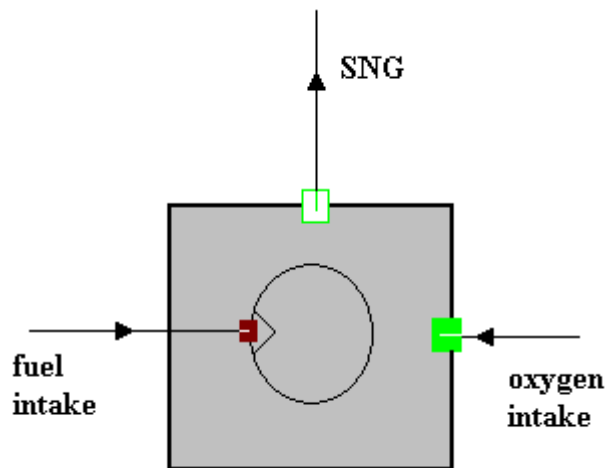
την αντίδραση ως εξής, για παράδειγμα : $\Delta A = A_{CO} + A_{H_2O} - A_{CO_2} - A_{H_2}$,
 χρησιμοποιώντας τιμές από θερμοδυναμικούς πίνακες.

- Στοιχειομετρική ανάλυση της χημικής αντίδρασης σχηματισμού μεθανίου:

$$\left(10^{K_{-M}(T)} \frac{n_{sg/H_2}}{2,0158} \cdot MG \cdot \frac{P_{sg}}{1,01325} - \frac{n_{sg/CH_4}}{16,0426} \right) 10000 = 0$$

όπου, $K_{-M}(T)$ είναι η σταθερά ισορροπίας της αντίδρασης, ανάλογα με τη θερμοκρασία του αερίου και υπολογίζονται όπως και πριν, απλά αλλάζοντας τις σταθερές ΔA , ΔB κ.ο.κ. αφού πρόκειται για άλλη αντίδραση, δηλαδή $\Delta A = A_C + 2A_{H_2} - A_{CH_4}$

Το μοντέλο του αεριοποιητή στο IPSE Pro φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα . Σχηματική απεικόνιση μοντέλου αεριοποιητή οξυγόνου σύμφωνα με το IPSEpro™

Οι εντολές του αεριοποιητή στο MDK του IPSEpro™ είναι οι ακόλουθες:

calculating the heat of formation of the fuel from the lower heating value of the fuel at 25°C

```
ffuel: heat_of_f - LHV = -fuel.FuelComposition.myC*393785.3/12.011 -  
fuel.FuelComposition.myH*241988.7/2.0158  
- fuel.FuelComposition.myS*297040.9/32.06 -  
fuel.FuelComposition.myWater *241988.7/18.0152;
```

energy balance with heat of formation

```
fenergy: (fuel.h - fuel.FuelComposition.cp*25 + heat_of_f) * fuel.mass +  
(feed_gas.Composition.fhf0() + feed_gas.h) * feed_gas.mass =  
q_trans + (drain_gas.Composition.fhf0() + drain_gas.h) * drain_gas.mass;
```

```
fqtrans: q_trans = fuel.mass * LHV * heat_loss/100;
```

pressure drop in the gasifier

```
fdp_g: feed_gas.p - delta_p_gas = drain_gas.p;
```

Enthalpies sximatismou

```
f889: HofF1=drain_gas.Composition.fhf0();
```

```
f990: HofF2=CH4_bypass.Composition.fhf0();
```

```
# -----
```

```
-----
```

heating value of the product gas

```
#-----
```

```
-----
```

```
f111: CH4_bypass.p=drain_gas.p;
```

f112:CH4_bypass.t=drain_gas.t;

mole fractions

f66: xCH4=drain_gas.Composition.CH4/16/MG_i;

f76: xCO=drain_gas.Composition.CO/28/MG_i;

f86: xCO2=drain_gas.Composition.CO2/44/MG_i;

f96: xH2=drain_gas.Composition.H2/2/MG_i;

f106: xH2O=drain_gas.Composition.H2O/18/MG_i;

f116: xH2S=drain_gas.Composition.H2S/34/MG_i;

f126: xN2=drain_gas.Composition.N2/28/MG_i;

f1226: xO2=drain_gas.Composition.O2/32/MG_i;

f1236: xSO2=drain_gas.Composition.SO2/64/MG_i;

flambda:

lambda=feed_gas.mass/((fuel.FuelComposition.myC*2.665+fuel.FuelComposition.myH*7.936+fuel.FuelComposition.myS*0.998-fuel.FuelComposition.myO*1)*fuel.mass);

ifl HV_Source == Boie then

fLHV: LHV = 34835 * fuel.FuelComposition.myC
+ 93870 * fuel.FuelComposition.myH
+ 10465 * fuel.FuelComposition.myS
+ 6280 * fuel.FuelComposition.myN
- 10800 * fuel.FuelComposition.myO
- 2440 * fuel.FuelComposition.myWater;

fHHV: HHV = 34835 * fuel.FuelComposition.myC
+ 115911 * fuel.FuelComposition.myH
+ 10465 * fuel.FuelComposition.myS
+ 6280 * fuel.FuelComposition.myN
- 10800 * fuel.FuelComposition.myO;

endifl

else heating_value has to be user supplied

equations describing the chemical reactions

assumption: In the presence of H2, only H2S and no SO2 is formed

fWATER: drain_gas.Composition.WATER = 0.0; # no

WATER (everything must be H2O)

fAR: drain_gas.Composition.AR*drain_gas.mass =
feed_gas.Composition.AR*feed_gas.mass;

fC2H6: drain_gas.Composition.C2H6 = 0.0;

fC3H8: drain_gas.Composition.C3H8 = 0.0;

fH2S: drain_gas.Composition.H2S*drain_gas.mass = 34.0758 / 32.06 *

fuel.FuelComposition.myS * fuel.mass;

fN2: drain_gas.Composition.N2*drain_gas.mass =

feed_gas.Composition.N2*feed_gas.mass + fuel.FuelComposition.myN * fuel.mass;

fO2: drain_gas.Composition.O2 = 0.0;

fSO2: drain_gas.Composition.SO2 = 0.0;

fC: fuel.FuelComposition.myC * fuel.mass*conversionC +

12.011/44.0098*feed_gas.Composition.CO2 * feed_gas.mass -

12.011/16.042*CH4_bypass.Composition.CH4*CH4_bypass.mass=

(12.011/16.0426*drain_gas.Composition.CH4 +

12.011/28.0104*drain_gas.Composition.CO +

12.011/44.0098*drain_gas.Composition.CO2) * drain_gas.mass;

fH: (fuel.FuelComposition.myH +

2.0158/18.0152*fuel.FuelComposition.myWater) * fuel.mass +

2.0158/18.0152*feed_gas.Composition.H2O * feed_gas.mass -

4/16*CH4_bypass.Composition.CH4*CH4_bypass.mass=

(4.0316/16.0426*drain_gas.Composition.CH4 + drain_gas.Composition.H2 +
 2.0158/18.0152*drain_gas.Composition.H2O +
 2.0158/34.0758*drain_gas.Composition.H2S) * drain_gas.mass;

fO: (fuel.FuelComposition.myO +
 15.9994/18.0152*fuel.FuelComposition.myWater) * fuel.mass +
 (15.9994/18.0152*feed_gas.Composition.H2O +
 feed_gas.Composition.O2 + 31.9988/44.0098*feed_gas.Composition.CO2) *
 feed_gas.mass =
 (15.9994/28.0104*drain_gas.Composition.CO +
 31.9988/44.0098*drain_gas.Composition.CO2 +
 15.9994/18.0152*drain_gas.Composition.H2O) * drain_gas.mass;

fAsh: mass_Ash = fuel.FuelComposition.myAsh * fuel.mass
 +fuel.FuelComposition.myC * fuel.mass * (1- conversionC);

calculation of the mean molecular weight of the drain gas: only the following
 constituents may be present in the drain gas

No WATER, C2H6, C3H8, O2, SO2 in the drain gas

f_MG_i: MG_i = drain_gas.Composition.AR/39.948 +
 drain_gas.Composition.CH4/16.0426 + drain_gas.Composition.CO/28.0104 +
 drain_gas.Composition.CO2/44.0098
 + drain_gas.Composition.H2/2.0158 + drain_gas.Composition.H2O/18.0152 +
 drain_gas.Composition.H2S/34.0758 + drain_gas.Composition.N2/28.0134;

equations describing the equilibrium in the drain_gas

law of mass action (Guldenberg and Waage), ideal gas assumed

@# the equilibrium equations are scaled with 1e4 for better calculation accuracy

@# the equilibrium constants are given in logarithmic units for better interpolation
 and put in the equation to the power of 10

#####

```

# ##### HOMOGENEOUS REACTIONS
#####
# #####

# watrgas shift reaction CO + H2O <-> CO2 + H2
ifl equilib_SH == YES then
    fShift: (10^K_SH(drain_gas.t) * drain_gas.Composition.CO/28.0104 *
drain_gas.Composition.H2O/18.0152 -
        drain_gas.Composition.CO2/44.0098 *
drain_gas.Composition.H2/2.0158)*10000 = 0.0;
endifl

#
#####
# ##### HETEROGENEOUS REACTIONS
#####
#
#####

# Methane reaction C + 2 H2 <-> CH4
ifl equilib_M == YES then
    fMethane: (10^K_M(drain_gas.t) *
drain_gas.Composition.H2^2/2.0158^2 * MG_i * drain_gas.p/1.01325 -
drain_gas.Composition.CH4/16.0426)*1e4 = 0.0;
endifl

```

```

#
#####
#####

tWater_feed_gas:    test ( feed_gas.Composition.WATER < 1e-3) error "No
WATER allowed, use H2O instead";

# tests for valid feed_gas composition
tC2H6_feed_gas:    test ( feed_gas.Composition.C2H6 < 1e-3) error "No C2H6
allowed in feed_gas stream";
tC3H8_feed_gas:    test ( feed_gas.Composition.C3H8 < 1e-3) error "No C3H8
allowed in feed_gas stream";
tCH4_feed_gas:     test ( feed_gas.Composition.CH4 < 1e-3) error "No CH4
allowed in feed_gas stream";
tCO_feed_gas:test ( feed_gas.Composition.CO < 1e-3) error "No CO allowed in
feed_gas stream";
tH2_feed_gas: test ( feed_gas.Composition.H2 < 1e-3) error "No H2 allowed in
feed_gas stream";
tH2Sfeed_gas: test ( feed_gas.Composition.H2S < 1e-3) error "No H2S allowed in
feed_gas stream";
tSO2_feed_gas:     test ( feed_gas.Composition.SO2 < 1e-3) error "No SO2
allowed in feed_gas stream";

tPressureDrop_gas:      test ( delta_p_gas >= 0.0 ) warning "Negative pressure
drop";

# tconversionC:      test (conversionC <= 1.0) error "Carbon conversion > 1.0, not
enough C in fuel";

```

Παράρτημα 3. Μοντελοποίηση αντιδραστήρα μετατόπισης νερού – αερίου στο MDK του IPSE-Pro™

Η αντίδραση που μοντελοποιείται στο «κουτί» του αντιδραστήρα shift είναι η :



Η μοντελοποίηση της αντίδρασης αυτής υλοποιήθηκε όταν η αντίδραση βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας.

Στο μοντέλο μας έχουμε απουσία νερού, C_2H_6 , C_3H_8 , SO_2 , H_2S και O_2 . Επίσης η ποσότητα του αργού (AR) και αζώτου (N_2) του syngas παραμένει η ίδια και στο παραγόμενο αέριο από την αντίδραση shift. Έτσι, επί της ουσίας στον αντιδραστήρα μετατόπισης νερού – αερίου μεταβάλλονται οι περιεκτικότητες των CH_4 , CO , CO_2 , H_2 , H_2O (υδρατμών) .

Οι υπολογισμοί που μοντελοποιούν το στοιχείο του αντιδραστήρα στο κύκλωμα είναι:

- Ενεργειακός ισολογισμός στον αντιδραστήρα :

$$m_{fg} \cdot H_{fg} + m_w \cdot H_w = m_{dg} \cdot H_{dg} + Q$$

όπου

m_{fg} : μάζα εισαγόμενου συνθετικού αερίου

H_{fg} : ενθαλπία εισαγόμενου συνθετικού αερίου

m_w : μάζα εισαγόμενου νερού

H_w : ενθαλπία εισαγόμενου νερού

m_{dg} : μάζα παραγόμενου αερίου

H_{dg} : ενθαλπία παραγόμενου αερίου

Q : ψυκτική ισχύς που καταναλώνεται

- Απουσία ποσότητας νερού, C_2H_6 , C_3H_8 , O_2 και SO_2 στο παραγόμενο αέριο
- $n_{fg,\text{CH}_4} \cdot m_{fg} = n_{dg,\text{CH}_4} \cdot m_{dg}$

- $\left(\frac{12,011}{44,0098} \cdot n_{dg,CO_2} \cdot \frac{12,011}{28,0104} \cdot n_{dg,CO} + \frac{12,011}{16,0426} \cdot n_{dg,CH_4} \right) \cdot m_{dg} = \left(\frac{12,011}{44,0098} \cdot n_{fg,CO_2} \right.$
 $\left. \cdot \frac{12,011}{28,0104} \cdot n_{fg,CO} + \frac{12,011}{16,0426} \cdot n_{fg,CH_4} \right) \cdot m_{fg}$
- $\left(\frac{2,0158}{34,0758} \cdot n_{dg,H_2S} + \frac{2,0158}{18,0152} \cdot n_{dg,H_2O} + \frac{4,0316}{16,0426} \cdot n_{dg,CH_4} + n_{dg,H_2} \right) \cdot m_{dg} = \left(\right.$
 $\frac{2,0158}{34,0758} \cdot n_{fg,H_2S} + \frac{2,0158}{18,0152} \cdot n_{fg,H_2O} + \frac{4,0316}{16,0426} \cdot n_{fg,CH_4} + n_{df,H_2} \left. \right) \cdot m_{fg} +$
 $\frac{2,0158}{18,0152} \cdot n_{w,H_2O} \cdot m_{fw}$
- $\left(\frac{15,994}{18,0152} \cdot n_{dg,H_2O} + \frac{15,994}{28,0194} \cdot n_{dg,CO} + \frac{31,9988}{44,0098} \cdot n_{dg,CO_2} \right) \cdot m_{dg} =$
 $\left(\frac{15,994}{18,0152} \cdot n_{dg,H_2O} + \frac{15,994}{28,0194} \cdot n_{dg,CO} + \frac{31,9988}{44,0098} \cdot n_{dg,CO_2} \right) \cdot m_{dg}$
 $+ \frac{15,994}{18,0152} \cdot n_{fw,H_2O} \cdot m_{fw}$
- $K_{SH}(t) \cdot \frac{n_{dg,CO}}{28,0104} \frac{n_{dg,H_2O}}{18,0152} - \frac{n_{dg,CO_2}}{44,0098} \cdot \frac{n_{dg,H_2}}{2,0158} = 0$ όπου οι συντελεστές

$K_{SH}(t)$ υπολογίζονται όπως και στον αεριοποιητή :

$$\ln(K_{SH}) = \ln K^0 + \frac{\Delta A}{R} \ln \frac{T}{T_0} + \frac{\Delta B}{2R} (T - T_0) + \frac{\Delta C}{6R} (T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta D}{12R} (T^3 - T_0^3)$$

όπου $\ln K^0 = \frac{-\Delta G^0}{R T_0} = -\sum \frac{\nu_i \Delta G_{fi(T_0)}}{R T_0}$ και $\Delta A, \Delta B, \Delta C$ και ΔD υπολογίζονται

για την αντίδραση ως εξής, για παράδειγμα : $\Delta A = A_{CO} + A_{H_2O} - A_{CO_2} - A_{H_2}$, χρησιμοποιώντας τιμές από θερμοδυναμικούς πίνακες.

- $\frac{n_{dg,H_2}}{2,0158} - 3 \frac{n_{dg,CO}}{28,0104} = 0$

- Υπολογισμός μοριακού βάρους παραγόμενου αερίου:

$$MG = \frac{n_{dg,AR}}{39,948} + \frac{n_{dg,CH_4}}{16,0426} + \frac{n_{dg,CO}}{28,0104} + \frac{n_{dg,CO_2}}{44,0098} + \frac{n_{dg,H_2}}{2,0158} + \frac{n_{dg,H_2O}}{18,0152} + \frac{n_{dg,H_2S}}{34,0758} + \frac{n_{dg,N_2}}{28,0134}$$

- Ψυκτική ισχύς : $Q = \frac{\dot{m}_{cm}(H_{cm,d} - H_{cm,f})}{3600}$

Οι εντολές στο MDK του IPSEpro™ είναι οι ακόλουθες :

fenergy:

$(\text{feed_gas.Composition.fhf0() + feed_gas.h}) * \text{feed_gas.mass} + (\text{feed_nero.Composition.fhf0() + feed_nero.h}) * \text{feed_nero.mass} = (\text{drain_gas.Composition.fhf0() + drain_gas.h}) * \text{drain_gas.mass} + Q;$

fWATER: $\text{drain_gas.Composition.WATER} * \text{drain_gas.mass} = 0.0;$

fAR: $\text{drain_gas.Composition.AR} * \text{drain_gas.mass} = \text{feed_gas.Composition.AR} * \text{feed_gas.mass};$

fN2: $\text{drain_gas.Composition.N2} * \text{drain_gas.mass} = \text{feed_gas.Composition.N2} * \text{feed_gas.mass};$

fC2H6: $\text{drain_gas.Composition.C2H6} * \text{drain_gas.mass} = 0.0;$

fC3H8: $\text{drain_gas.Composition.C3H8} * \text{drain_gas.mass} = 0.0;$

#fO2: $\text{drain_gas.Composition.O2} = 0;$

fO2:

$\text{feed_gas.Composition.O2} * \text{feed_gas.mass} = \text{drain_gas.Composition.O2} * \text{drain_gas.mass};$

fH2S:

$\text{drain_gas.Composition.H2S} * \text{drain_gas.mass} = \text{feed_gas.Composition.H2S} * \text{feed_gas.mass};$

fSO2: $\text{drain_gas.Composition.SO2} * \text{drain_gas.mass} = 0;$

fCH4:

$\text{feed_gas.Composition.CH4*feed_gas.mass}=\text{drain_gas.Composition.CH4*drain_gas.mass};$

fC:

$(12.011/44.0098*\text{drain_gas.Composition.CO2}+12.011/28.0104*\text{drain_gas.Composition.CO}+12.011/16.0426*\text{drain_gas.Composition.CH4})*\text{drain_gas.mass}=\text{drain_gas.mass};$

$(12.011/44.0098*\text{feed_gas.Composition.CO2}+12.011/28.0104*\text{feed_gas.Composition.CO}+12.011/16.0426*\text{feed_gas.Composition.CH4})*\text{feed_gas.mass}=\text{feed_gas.mass};$

fH:

$(2.0158/34.0758*\text{drain_gas.Composition.H2S}+2.0158/18.0152*\text{drain_gas.Composition.H2O}+4.0316/16.0426*\text{drain_gas.Composition.CH4}+\text{drain_gas.Composition.H2})*\text{drain_gas.mass}=\text{drain_gas.mass};$

$(2.0158/34.0758*\text{feed_gas.Composition.H2S}+2.0158/18.0152*\text{feed_gas.Composition.H2O}+4.0316/16.0426*\text{feed_gas.Composition.CH4}+\text{feed_gas.Composition.H2})*\text{feed_gas.mass}=\text{feed_gas.mass};$

$(2.0158/34.0758*\text{feed_gas.Composition.H2S}+2.0158/18.0152*\text{feed_gas.Composition.H2O}+4.0316/16.0426*\text{feed_gas.Composition.CH4}+\text{feed_gas.Composition.H2})*\text{feed_gas.mass}=\text{feed_gas.mass};$

$(2.0158/34.0758*\text{feed_gas.Composition.H2S}+2.0158/18.0152*\text{feed_gas.Composition.H2O}+4.0316/16.0426*\text{feed_gas.Composition.CH4}+\text{feed_gas.Composition.H2})*\text{feed_gas.mass}=\text{feed_gas.mass};$

fO:

$(15.994/18.0152*\text{drain_gas.Composition.H2O}+15.994/28.0104*\text{drain_gas.Composition.CO}+31.9988/44.0098*\text{drain_gas.Composition.CO2})*\text{drain_gas.mass}=\text{drain_gas.mass};$

$(15.994/18.0152*\text{feed_gas.Composition.H2O}+15.994/28.0104*\text{feed_gas.Composition.CO}$

$+31.9988/44.0098*\text{feed_gas.Composition.CO2})*\text{feed_gas.mass}+15.994/18.0152*\text{feed_nero.Composition.H2O}*$
 $\text{feed_nero.mass};$

fshift:

$K_SH(\text{drain_gas.t})*\text{drain_gas.Composition.CO}/28.0104*\text{drain_gas.Composition.H2O}/18.0152-$

$\text{drain_gas.Composition.CO2}/44.0098*\text{drain_gas.Composition.H2}/2.0158=0.0;$

#fanalogia: $\text{drain_gas.Composition.H2}/2.0158-3*\text{drain_gas.Composition.CO}/28.0104=0;$

fdp_g: $\text{feed_gas.p}-\text{delta_p_gas}=\text{drain_gas.p};$

fMG_i:

$\text{MG}_i=\text{drain_gas.Composition.AR}/39.948+\text{drain_gas.Composition.CH4}/16.0426+\text{drain_gas.Composition.CO}/28.0104+\text{drain_gas.Composition.CO2}/44.0098$

$+\text{drain_gas.Composition.H2}/2.0158+\text{drain_gas.Composition.H2O}/18.0152+\text{drain_gas.Composition.H2S}/34.0758+\text{drain_gas.Composition.N2}/28.0134;$

fdp_nero: $\text{feed_nero.p}-\text{delta_p_nero}=\text{drain_gas.p};$

fcooling: $Q=(\text{cooling_medium_out.massflow}*\text{cooling_medium_out.h}-\text{cooling_medium_in.massflow}*\text{cooling_medium_in.h})/3600;$

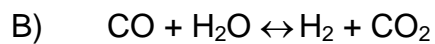
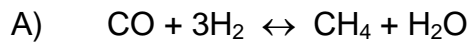
fcooling_mass:

cooling_medium_in.massflow=cooling_medium_out.massflow;

fcooling_dploss: cooling_medium_out.p=cooling_medium_in.p-dp_cooling;

Παράτημα 4. Μοντελοποίηση μεθανοποιητή στο MDK του IPSE-Pro™.

Όπως αναφέρθηκε και πριν, οι δύο βασικές χημικές αντιδράσεις που θα μοντελοποιήσουμε είναι :



Κατά τη μοντελοποίηση, οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι παρακάτω :

- Εξίσωση ενέργειας : $H_{fg} \cdot m_{fg} = H_{dg} \cdot m_{dg} + Q$

όπου

m_{fg} : μάζα εισαγόμενου συνθετικού αερίου

H_{fg} : ενθαλπία εισαγόμενου συνθετικού αερίου

m_{dg} : μάζα παραγόμενου αερίου

H_{dg} : ενθαλπία παραγόμενου αερίου

Q : ψυκτική ισχύς που καταναλώνεται

- Ολική ενθαλπία αντιδρώντων και προϊόντων

$$H_{react} = H_{fg} \cdot m_{fg} \quad (\text{αντιδρόντα})$$

$$H_{prod} = H_{dg} \cdot m_{dg} \quad (\text{προϊόντα})$$

- $$\left(\frac{12,011}{44,0098} \cdot n_{dg,CO_2} + \frac{12,011}{28,0104} \cdot n_{dg,CO} + \frac{12,011}{16,0426} \cdot n_{dg,CH_4} \right) \cdot m_{dg} =$$

$$\left(\frac{12,011}{44,0098} \cdot n_{fg,CO_2} + \frac{12,011}{28,0104} \cdot n_{fg,CO} + \frac{12,011}{16,0426} \cdot n_{fg,CH_4} \right) \cdot m_{fg}$$

- $$\left(\frac{15,9994}{18,0152} \cdot n_{dg,H_2O} + \frac{15,9994}{28,0104} \cdot n_{dg,CO} + \frac{31,9988}{44,0098} \cdot n_{dg,CO_2} \right) \cdot m_{dg} =$$

$$\left(\frac{15,9994}{18,0152} \cdot n_{fg,H_2O} + \frac{15,9994}{28,0104} \cdot n_{fg,CO} + \frac{31,9988}{44,0098} \cdot n_{fg,CO_2} \right) \cdot m_{fg}$$

- Τα υπόλοιπα συστατικά του αερίου παραμένουν ως έχουν

- $$\left(\frac{4,0316}{16,0426} \cdot n_{dg,CH_4} + \frac{2,0158}{18,0152} \cdot n_{dg,H_2O} + \frac{2,0158}{34,0758} \cdot n_{dg,H_2S} + n_{dg,H_2} \right) \cdot m_{dg} =$$

$$\left(\frac{4,0316}{16,0426} \cdot n_{fg,CH_4} + \frac{2,0158}{18,0152} \cdot n_{fg,H_2O} + \frac{2,0158}{34,0758} \cdot n_{fg,H_2S} + n_{fg,H_2} \right) \cdot m_{fg}$$

- Εξίσωση ισορροπίας για την αντίδραση Shift

$$\left(10^{K_{-SH(t)}} \cdot \frac{n_{dg,CO}}{28,0104} \cdot \frac{n_{dg,H_2O}}{18,0152} - \frac{n_{dg,CH_4}}{44,0098} \cdot \frac{n_{dg,H_2}}{2,0158} \right) \cdot 10000 = 0$$

- Εξίσωση ισορροπίας για την αντίδραση μεθανοποίησης

$$\left[\frac{1}{10^{K_{-SR(t)}}} \cdot \left(\frac{P_{dg}}{1,01325} \right)^2 \cdot \frac{n_{CO}}{28,0104} \cdot \left(\frac{n_{H_2}}{2,0158} \right)^3 - \frac{n_{CH_4}}{16,0426} \cdot \frac{n_{H_2O}}{18,0152} \cdot (MG - i)^2 \right] \cdot 1000 = 0$$

- Υπολογισμός μοριακού βάρους παραγόμενου αερίου

$$MG \quad \quad \quad =$$

$$\frac{n_{dg,AR}}{39,948} + \frac{n_{dg,CH_4}}{16,0426} + \frac{n_{dg,CO}}{28,0104} + \frac{n_{dg,CO_2}}{44,0098} + \frac{n_{dg,H_2}}{2,0158} + \frac{n_{dg,H_2O}}{18,0152} + \frac{n_{dg,H_2S}}{34,0758} + \frac{n_{dg,N_2}}{28,0134}$$

- Ψυκτική ισχύς : $Q = \frac{\dot{m}_{cm} (H_{cm,d} - H_{cm,f})}{3600}$

Οι εντολές στο MDK του IPSEpro™ είναι οι ακόλουθες:

```
# CO + 3 H2 <-> CH4 + H2O    Methanation
#-----
-
# CO + H2O <-> H2 + CO2    Shift
#-----
---

#fmass:    drain_gas.mass=feed_gas.mass;

fO2:       drain_gas.Composition.O2=feed_gas.Composition.O2;

fenergy:
(feed_gas.Composition.fhf0()+feed_gas.h)*feed_gas.mass=(drain_gas.Comp
osition.fhf0()+drain_gas.h)*drain_gas.mass +Q;

fh1:
h_react=(feed_gas.Composition.fhf0()+feed_gas.h)*feed_gas.mass;

fh2:
h_prod=(drain_gas.Composition.fhf0()+drain_gas.h)*drain_gas.mass;

fWATER:    drain_gas.Composition.WATER* drain_gas.mass = 0.0;

fAR:       drain_gas.Composition.AR* drain_gas.mass=
feed_gas.Composition.AR* feed_gas.mass;
```

fN2: drain_gas.Composition.N2* drain_gas.mass=
feed_gas.Composition.N2* feed_gas.mass;

fO:
(15.9994/18.0152*drain_gas.Composition.H2O+15.9994/28.0104*drain_gas.
Composition.CO

+31.9988/44.0098*drain_gas.Composition.CO2)*drain_gas.mass=

(15.9994/18.0152*feed_gas.Composition.H2O+15.9994/28.0104*feed_gas.C
omposition.CO

+31.9988/44.0098*feed_gas.Composition.CO2)*feed_gas.mass;

fSO2: drain_gas.Composition.SO2*drain_gas.mass=0.0;

fC:
(12.011/44.0098*drain_gas.Composition.CO2+12.011/28.0104*drain_gas.Co
mposition.CO

+12.011/16.0426*drain_gas.Composition.CH4)*drain_gas.mass=

(12.011/44.0098*feed_gas.Composition.CO2+12.011/28.0104*feed_gas.Com
position.CO

+12.011/16.0426*feed_gas.Composition.CH4)*feed_gas.mass;

fC2H6: drain_gas.Composition.C2H6 * drain_gas.mass=0.0;

fC3H8: drain_gas.Composition.C3H8 * drain_gas.mass=0.0;

fH2S:
drain_gas.Composition.H2S*drain_gas.mass=feed_gas.Composition.H2S*fee
d_gas.mass;

```
fH:      (4.0316/16.0426*drain_gas.Composition.CH4+
drain_gas.Composition.H2
          +2.0158/18.0152*
drain_gas.Composition.H2O+2.0158/34.0758*drain_gas.Composition.H2S)*dr
ain_gas.mass
```

```
=(4.0316/16.0426*feed_gas.Composition.CH4+feed_gas.Composition.H2
  + 2.0158/18.0152*
feed_gas.Composition.H2O+2.0158/34.0758*feed_gas.Composition.H2S)*fee
d_gas.mass;
```

```
# Equations describing Shift and Inverse Reforming chemical reactions
```

```
# watergas shift reaction CO + H2O <-> CO2 + H2
```

```
ifl equilib_SH == YES then
```

```
  fShift: (10^K_SH(drain_gas.t) * drain_gas.Composition.CO/28.0104 *
drain_gas.Composition.H2O/18.0152 -
          drain_gas.Composition.CO2/44.0098 *
drain_gas.Composition.H2/2.0158)*1e4 = 0.0;
endifl
```

```
# inverse steam reforming reaction CO + 3 H2 <-> CH4 + H2O
```

```
ifl equilib_SR == YES then
```

```
  fSteamReform: ((1/(10^K_SR(drain_gas.t))) *
(drain_gas.p/1.01325)^2 * drain_gas.Composition.CO/28.0104 *
drain_gas.Composition.H2^3/2.0158^3-
                drain_gas.Composition.CH4/16.0426 *
drain_gas.Composition.H2O/18.0152 * MG_i^2 ) *1e4 = 0.0 ;
endifl
```

fdp_g: feed_gas.p-delta_p_gas=drain_gas.p;

fMG_i:

MG_i=drain_gas.Composition.AR/39.948+drain_gas.Composition.CH4/16.04
26+drain_gas.Composition.CO/28.0104+drain_gas.Composition.CO2/44.009
8

+drain_gas.Composition.H2/2.0158+drain_gas.Composition.H2O/18.0152+dr
ain_gas.Composition.H2S/34.0758+drain_gas.Composition.N2/28.0134;

fcooling: $Q=(\text{cooling_medium_out.massflow}*\text{cooling_medium_out.h} -$
 $\text{cooling_medium_in.massflow}*\text{cooling_medium_in.h})/3600;$

fcooling_mass:

cooling_medium_in.massflow=cooling_medium_out.massflow;

fcooling_dploss: cooling_medium_out.p=cooling_medium_in.p-dp_cooling;

Παράρτημα 5. Μοντελοποίηση στοιχείου δέσμευσης CO₂ στο MDK του IPSE-Pro™.

fmass: feed_gas.mass=drain_gas.mass+drain_CO2.mass;

fmassCO2: drain_CO2.mass=feed_gas.mass*
n_sep*feed_gas.Composition.CO2;

fdp_g: feed_gas.p-delta_p=drain_gas.p;

fdp: feed_gas.p-delta_p=drain_CO2.p;

ft: feed_gas.t=drain_gas.t;

ft2: feed_gas.t=drain_CO2.t;

#fenergy:

feed_gas.mass*(feed_gas.Composition.fhf0()+feed_gas.h)=drain_gas.mass*(
drain_gas.Composition.fhf0()+drain_gas.h)+drain_CO2.mass*(drain_CO2.Co
mposition.fhf0()+drain_CO2.h);

fCH4:

drain_gas.Composition.CH4*drain_gas.mass=feed_gas.Composition.CH4*fee
d_gas.mass;

#fCO2:

drain_gas.Composition.CO2*drain_gas.mass=feed_gas.Composition.CO2*fee
d_gas.mass;

#f22:

drain_gas.mass*drain_gas.Composition.CO2=feed_gas.mass*feed_gas.Com
position.CO2-drain_CO2.mass;

fCO:

$\text{drain_gas.Composition.CO} \times \text{drain_gas.mass} = \text{feed_gas.Composition.CO} \times \text{feed_gas.mass};$

fH2:

$\text{drain_gas.Composition.H2} \times \text{drain_gas.mass} = \text{feed_gas.Composition.H2} \times \text{feed_gas.mass};$

fH2O:

$\text{drain_gas.Composition.H2O} \times \text{drain_gas.mass} = \text{feed_gas.Composition.H2O} \times \text{feed_gas.mass};$

fAr:

$\text{drain_gas.Composition.AR} \times \text{drain_gas.mass} = \text{feed_gas.Composition.AR} \times \text{feed_gas.mass};$

fso2:

$\text{drain_gas.Composition.SO2} \times \text{drain_gas.mass} = \text{feed_gas.Composition.SO2} \times \text{feed_gas.mass};$

fwater:

$\text{drain_gas.Composition.WATER} \times \text{drain_gas.mass} = \text{feed_gas.Composition.WATER} \times \text{feed_gas.mass};$

fH2S:

$\text{drain_gas.Composition.H2S} \times \text{drain_gas.mass} = \text{feed_gas.Composition.H2S} \times \text{feed_gas.mass};$

fO2:

$\text{drain_gas.Composition.O2} \times \text{drain_gas.mass} = \text{feed_gas.Composition.O2} \times \text{feed_gas.mass};$

fN2:

$\text{drain_gas.Composition.N2} \times \text{drain_gas.mass} = \text{feed_gas.Composition.N2} \times \text{feed_gas.mass};$

fC2H6:

$\text{drain_gas.Composition.C2H6} * \text{drain_gas.mass} = \text{feed_gas.Composition.C2H6} * \text{feed_gas.mass};$

fC3H8:

$\text{drain_gas.Composition.C3H8} * \text{drain_gas.mass} = \text{feed_gas.Composition.C3H8} * \text{feed_gas.mass};$