# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Μέθοδοι κρυογονικής υγροποίησης με εργαζόμενο μέσο αέριο άζωτο



# Διπλωματική εργασία

Γεωργούλης Ηλίας

Επιβλέπουσα: **Ειρήνη Κορωνάκη** 

Επίκουρος Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2017

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΡΥΟΓΟΝΙΚΗΣ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ	5
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.2 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	5
1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΑΖΩΤΟ, ΟΞΥΓΟΝΟ ΚΑΙ ΑΡΓΟ	7
1.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕΘΑΝΙΟΥ-ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ	20
1.5 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΝΕΟ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΟΝΟ	22
1.6 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΗΛΙΟ	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΡΥΟΓΟΝΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ	33
2.1 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	33
2.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ	34
2.2.1 Η ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ VIRIAL	34
2.2.2 ΤΟ ΘΕΩΡΗΜΑ ΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ	35
2.2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ VIRIAL	37
2.2.4 ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ PENG-ROBINSON	38
2.2.5 ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΥΓΡΟΥ-ΑΤΜΟΥ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	39
2.2.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΛΥΤΟΤΗΤΑΣ ΚΡΥΟΓΟΝΙΚΩΝ ΑΕΡΙΩΝ	40
2.2.7 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΡΥΟΓΟΝΙΚΑ ΠΡΟΩΘΗΤΙΚΑ ΓΙΑ ΠΥΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΩΣΗ	43
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	43
3.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ	44
3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ	45
3.4 ΕΙΔΙΚΗ ΩΘΗΣΗ	49
3.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΤΟΞΕΥΣΗΣ	49
3.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	49
3.5.2 ΚΡΥΟΓΟΝΙΚΑ ΠΡΟΩΘΗΤΙΚΑ	50
3.5.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ	51
3.5.4 BOIL-OFF	51
3.6 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΠΡΟΩΘΗΤΙΚΩΝ	52
3.7 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ	52
3.8 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΙΕΣΗΣ	52
3.9 ΑΣΦΑΛΕΙΑ	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	53

4.1 ΜΕΘΟΔΟΣ SIMPLE LINDE-HAMPSON	. 53
4.2 ΜΕΘΟΔΟΣ PRECOOLED LINDE-HAMPSON	. 55
4.3 ΜΕΘΟΔΟΣ DUAL PRESSURE LINDE-HAMPSON	. 57
4.4 ΜΕΘΟΔΟΣ SIMPLE CLAUDE	. 59
4.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΡΙΤΖΑ	. 61
4.6 ΜΕΘΟΔΟΣ DUAL PRESSURE CLAUDE	. 64
4.7 ΜΕΘΟΔΟΣ HEYLANDT	. 67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	. 70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	. 71
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	. 72
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	. 72

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο κλάδος της θερμοδυναμικής που πραγματεύεται τη διαδικασία επίτευξης πολύ χαμηλών θερμοκρασιών, δηλαδή η κρυογονική, γνωρίζει μια ραγδαία εξέλιξη στη σημερινή εποχή, που όμοιά της δεν έχει υπάρξει στο παρελθόν. Η ανάγκη για χαμηλές θερμοκρασίες απαντάται σε αρκετές διεργασίες διαφορετικών επιστημονικών περιοχών, συνεπώς η μελέτη και περαιτέρω εξέλιξη της κρυογονικής επιστήμης κρίνεται απαραίτητη. Στην παρούσα διπλωματική γίνεται αρχικά αναφορά στις βασικές μεθόδους κρυογονικής υγροποίησης, με διάφορα αέρια ως εργαζόμενα μέσα. Επιπλέον, ακολουθεί η παράθεση των βασικών νόμων που διέπουν την επιστήμη αυτή, καθώς και των ιδιοτήτων των εργαζόμενων μέσων που χρησιμοποιούνται. Ακόμα, γίνεται περιγραφή της εφαρμογής της κρυογονικής στις διαστημικές αποστολές, μέσω της χρησιμοποίησης κρυογονικών προωθητικών για την επίτευξη της απαραίτητης πυραυλικής πρόωσης. Έπειτα, στο υπολογιστικό μέρος της διπλωματικής γίνεται μοντελοποίηση σε περιβάλλον matlab των βασικών και πιο συχνά απαντώμενων μεθόδων κρυογονικής υγροποίησης, με άζωτο ως εργαζόμενο μέσο. Τέλος, παρατίθενται τα αποτελέσματά τους και σχολιασμός των, καθώς και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη των μεθόδων αυτών.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΡΥΟΓΟΝΙΚΗΣ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

#### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υγροποίηση κρυογονικών αερίων είναι ένα αποτέλεσμα το οποίο επιτυγχάνεται με ψύξη και συμπύκνωση των διαφόρων ρευμάτων, ουσιαστικά δηλαδή με κατάλληλη πρόσδοση ενέργειας στις διάφορες καταστάσεις. Ανάλογα την περίπτωση, χρησιμοποιείται ή αμελείται η χρήση εξωτερικού ψυκτικού μέσου. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται μέθοδοι υγροποίησης, εστιάζοντας στο γεγονός ότι με μικρές τροποποιήσεις είναι δυνατό να επιτευχθεί μέγιστη απόδοση και πλήρης ενεργειακή κάλυψη. Παρακάτω οι μέθοδοι αναφέρονται στην υγροποίηση αζώτου, φυσικού αερίου, υδρογόνου και ήλιου.

### 1.2 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η υγροποίηση περιγράφεται ιδανικά από τα δυο πρώτα μέρη του κύκλου Carnot, ήτοι μια αντιστρεπτή ισοθερμοκρασιακή συμπίεση και μια αντιστρεπτή ισεντροπική εκτόνωση. Το αέριο αρχικά συμπιέζεται ισοθερμοκρασιακά σε υπερκρίσιμη πίεση ώστε να αποκτήσει εντροπία ίση με αυτή του κορεσμένου υγρού. Έπειτα, το ρευστό εκτονώνεται αδιαβατικά ώστε να αποκτήσει κατάσταση κορεσμένου υγρού. Η ιδεατή αυτή κατάσταση όμως δεν ισχύει στην πραγματικότητα, καθώς η επίτευξη της απαιτεί πολύ μεγάλους λόγους πίεσης από συμπιεστή και στρόβιλο αντίστοιχα. Σε αυτούς τους θερμοδυναμικούς περιορισμούς οφείλεται και το γεγονός ότι στην πραγματική διαδικασία υγροποίησης το έργο που απαιτείται είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό της ιδανικής.



# Σχήμα 1.1: a)Σχηματική παράσταση της ροής και b)Διάγραμμα T-s ιδανικής διαδικασίας υγροποίησης

#### ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΕΡΓΟ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Χρησιμοποιώντας τον Πρώτο και το Δεύτερο Θερμοδυναμικό Νόμο για ανοιχτό σύστημα και για συνεχή ροή αερίου, αμελώντας τυχόν απώλειες ενέργειας, προκύπτουν:

$$\dot{Q} - \dot{W}_i = \sum \dot{m}_0 h_0 - \sum \dot{m}_i h_i$$
 (1.1)

$$\dot{m}T_1(s_2 - s_1) - \dot{W}_i = \dot{m}(h_f - h_1)$$
 (1.2)

ή στην τελική του μορφή:

$$-\frac{\dot{W}_{i}}{\dot{m}} = -\dot{W}_{l} = T_{1}(s_{1} - s_{f}) - (h_{1} - h_{f}) \quad (1.3)$$

Kαθώς  $s_2 = s_f$ 

Στην πρώτη εξίσωση  $\dot{Q}$  είναι η καθαρή τιμή μεταφοράς θερμότητας στο σύστημα και  $\dot{W}_i$  είναι το καθαρό ποσό έργου που δαπανήθηκε από το σύστημα.  $\dot{m}_0$  είναι ο εξερχόμενος και  $\dot{m}_i$  είναι ο εισερχόμενος ρυθμός παροχής μάζας.

Στην τελική μορφή  $\dot{W}_l$  είναι το καθαρό ποσό έργου που απαιτείται για τον υγροποιητή,  $\dot{m}_f$  είναι η παροχής μάζας του υγρού ίση με του ισοθερμικά συμπιεζομένου αερίου στον συμπιεστή.

Στην ιδανική θερμοδυναμικά περίπτωση, το αέριο υγροποιείται πλήρως, δηλαδή

$$\dot{m}_i = \dot{m}_f = \dot{m}$$

και το κλάσμα υγροποίησης  $y = \frac{m_f}{m}$ είναι ίσο με τη μονάδα. Σε πραγματικές καταστάσεις, το κλάσμα είναι μικρότερο της μονάδας.

#### ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΚΕΡΔΟΥΣ ΓΙΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Ο συντελεστής κέρδους FOM(αγγλική:figure of merit) δίνει μια τιμή σύγκρισης της επίδοσης της πραγματικής σε σχέση με την ιδανική διαδικασία υγροποίησης. Έτσι ορίζεται ως ο λόγος του ιδανικού έργου προς το πραγματικό που απαιτείται από μια πραγματική (μη ιδανική θερμοδυναμικά) διαδικασία υγροποίησης:

$$FOM = \frac{-W_i}{-W_l} \quad (1.4)$$

Στην περίπτωση που η θερμοκρασία περιβάλλοντος δεν είναι ίδια με την αρχική θερμοκρασία του αερίου τότε το ιδανικό έργο  $W_i$  δίδεται από τον τύπο:

$$-W_i = T_0 (s_1 - s_f) - (h_1 - h_f) \quad (1.5)$$

με Τ<sub>0</sub> θερμοκρασία περιβάλλοντος.

# 1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΑΖΩΤΟ, ΟΞΥΓΟΝΟ ΚΑΙ ΑΡΓΟ

Οι μέθοδοι υγροποίησης χωρίζονται ανάλογα με τη μέγιστη θερμοκρασία αναστροφής του προς υγροποίηση αερίου ώστε να διευκολυνθεί η μείωση της θερμοκρασίας του αερίου από τη διαδικασία εκτόνωσης J-T. Αν η θερμοκρασία αναστροφής του αερίου είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, τότε η ψύξη γίνεται μετά τη στραγγαλιστική βαλβίδα. Στην περίπτωση που ρευστό έχει θερμοκρασία τριπλού σημείου κατώτερη από αυτή της μέγιστης θερμοκρασίας αναστροφής των νέον, υδρογόνου και ηλίου τότε το ρευστό αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ψυκτικό για μείωση της θερμοκρασίας τους πριν την ψύξη τους από τη διαδικασία εκτόνωσης J-T. Είναι απαραίτητη δηλαδή η πρόψυξη αυτών των αερίων. Αέρια των οποίων η θερμοκρασία αναστροφής τους είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος δεν απαιτούν πρόψυξη. Τα αέρια αυτά είναι το άζωτο, το οξυγόνο, το αργό, το μεθάνιο και το φυσικό αέριο.

# ΜΕΘΟΔΟΣ SIMPLE LINDE-HAMPSON

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε το 1895 και βασίζεται στη στραγγαλιστική εκτόνωση για τη μείωση της θερμοκρασίας. Αρχικά το αέριο τροφοδοσίας δέχεται ισόθερμη ή πολυτροπική συμπίεση. Σε περίπτωση πολυτροπικής, το αέριο ψύχεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είτε στον ίδιο συμπιεστή είτε μέσω βαθμιαίων ψυκτών. Το αέριο έπειτα αφού πρώτα ψυχθεί μέσω εναλλάκτη θερμότητας από το κορεσμένο ρεύμα ατμού το οποίο προέρχεται από το διαχωριστή, στραγγαλίζεται ώστε να αποκτήσει πίεση ίση με την ατμοσφαιρική. Ένα ποσοστό του αερίου υγροποιείται και το υγρό διαχωρίζεται από τον κορεσμένο ατμό στο διαχωριστή. Το υπόλοιπο αναμειγνύεται με το make-up αέριο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται, αφού πρώτα περάσει από τον εναλλάκτη και μειώσει τη θερμοκρασία του αερίου τροφοδοσίας. Τα βήματα της μεθόδου αυτής είναι τα εξής:

- Ισόθερμη συμπίεση (1-2)
- Ψύξη του αερίου μέσω εναλλάκτη από το ρεύμα που προέρχεται από το διαχωριστή (2-3)
- Στραγγαλιστική εκτόνωση μέχρι την ατμοσφαιρική πίεση (3-4)
- Διαχωρισμός του κορεσμένου ατμού (4-6)
- Διαχωρισμός του κορεσμένου υγρού (4-5)
- Επιστροφή του κορεσμένου ατμού για ψύξη μέσω του εναλλάκτη και ανάμειξη με το make-up αέριο (6-7)



Σχήμα 1.2: Κύκλωμα Simple Linde-Hampson

Με εφαρμογή του πρώτου νόμου για κατάσταση σταθερής ανταλλαγής ενθαλπίας, ιδανικό εναλλάκτη θερμότητας (100% απόδοση) και μηδενικές απώλειες πίεσης-θερμοκρασίας, προκύπτει:

$$\dot{m}h_2 = \left(\dot{m} - \dot{m}_f\right)h_1 + \dot{m}_f h_f \quad (1.6)$$

Ενώ το κλάσμα υγροποίησης  $y=\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}}$ προκύπτει από τον τύπο:

$$y = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_5} \quad (1.7)$$

Στην περίπτωση που ο εναλλάκτης θεωρηθεί ότι έχει μια ελάχιστη θερμοκρασία προσέγγισης, τότε το αέριο επιστροφής βρίσκεται σε ένα σημείο λίγο πιο χαμηλά από το σημείο 1 του διαγράμματος T-s, έστω σημείο 7. Τότε προκύπτει:

$$\dot{m}h_2 = (\dot{m} - \dot{m}_f)h_7 + \dot{m}_f h_f$$
 (1.8)

και το κλάσμα υγροποίησης δίδεται από:

$$y^{+} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_5} \quad (1.9)$$

Για μεγιστοποίηση του κλάσματος, χρειάζεται η πίεση του αερίου τροφοδοσίας να έχει τιμή μεγέθους τέτοια ώστε μετά τη συμπίεση η ενθαλπία να είναι ελάχιστη. Επίσης, η τιμή του κλάσματος αυξάνει όσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία του αερίου τροφοδοσίας.

Η ενεργειακή απαίτηση δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$-\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2) \quad (1.10)$$

ενώ η ενέργεια ανά μονάδα υγροποιημένης μάζας:

$$-W_l = -\frac{\dot{W}}{\dot{m}_f} = -\frac{\dot{W}}{\dot{m} \cdot y} \quad (1.11)$$

Τα προαναφερθέντα ισχύουν με την παραδοχή ότι ο συμπιεστής είναι αντιστρεπτός και ισόθερμος.

#### ΜΕΘΟΔΟΣ PRECOOLED LINDE-HAMPSON

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το κλάσμα υγροποίησης αυξάνεται είτε με αύξηση της πίεσης είτε με μείωση της θερμοκρασίας. Εφόσον δεν είναι εφικτή πολύ μεγάλη αύξηση της πίεσης, στόχος της μεθόδου αυτής είναι η μείωση της θερμοκρασίας του αερίου τροφοδοσίας πριν την είσοδό του στον κύριο εναλλάκτη. Επίτευξη αυτού πραγματοποιείται μέσω ενός βοηθητικού εναλλάκτη που τοποθετείται πριν τον κύριο, στου οποίου το κύκλωμα διαρρέει ψυκτικό. Τα βήματα της μεθόδου αυτής είναι τα εξής:

- Ισόθερμη συμπίεση (1-2)
- Πρόψυξη με ψυκτικό μέσο και ρεύμα αέρα που προήλθε από τον κύριο εναλλάκτη θερμότητας (2-3)
- Ψύξη από τον κορεσμένο ατμό που προήλθε από το διαχωριστή (3-4)
- Στραγγαλιστική εκτόνωση (4-5)
- Διαχωρισμός του κορεσμένου ατμού (5-7)
- Διαχωρισμός του κορεσμένου υγρού (5-6)
- Επιστροφή του κορεσμένου ατμού για ψύξη μέσω του εναλλάκτη στην κατάσταση 3-4 (7-8)
- Επιστροφή του ρεύματος ατμού για ψύξη μέσω εναλλάκτη στην κατάσταση 2-3 (8-9)
- Εξάτμιση του ψυκτικού για ψύξη μέσω εναλλάκτη στην κατάσταση 2-3 (14-11)
- Συμπίεση του κορεσμένου ατμού του ψυκτικού (11-12)
- Ψύξη και συμπύκνωση του ψυκτικού (12-13)
- Εκτόνωση του ψυκτικού υγρού (13-14)



Σχήμα 1.3: Κύκλωμα Precooled Linde-Hampson

Με την πρόψυξη αυξάνεται το κλάσμα υγροποίησης, ενώ απαιτείται μικρότερος λόγος πίεσης. Αυξάνεται με αυτόν τον τρόπο η απόδοση σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο, χρειάζεται όμως επιπλέον έργο (υπάρχουν δυο συμπιεστές), το οποίο δίδεται από τον τύπο:

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2) + r(h_{12} - h_{13}) \quad (1.12)$$

ενώ το κλάσμα υγροποίησης προκύπτει από τον τύπο:

$$y = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_6} + \frac{r(h_{11} - h_{12})}{h_1 - h_6}$$
(1.13)

όπου ο δεύτερος όρος υποδηλώνει τη βελτίωση του κλάσματος λόγω της πρόψυξης, ενώ r είναι ο ρυθμός παροχής μάζας ψυκτικού, ίσος με:

$$r = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} \quad (1.14)$$

Η μέγιστη τιμή του κλάσματος δίδεται από τον τύπο:

$$y_{max} = \frac{h_8 - h_3}{h_8 - h_6} \quad (1.15)$$

Η ενεργειακή απαίτηση δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$-\frac{W}{\dot{m}} = T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2) + r(h_{12} - h_{11}) \quad (1.16)$$

με την παραδοχή ότι ο συμπιεστής είναι αντιστρεπτός, ισόθερμος και ο συμπιεστής για τον κύκλο του ψυκτικού είναι αντιστρεπτός και αδιαβατικός.

Παρατηρείται το γεγονός ότι για τον κύκλο με πρόψυξη απαιτείται περισσότερο έργο σε σχέση με τον απλό, όμως η αύξηση του κλάσματος υγροποίησης υπερκαλύπτει τις επιπλέον ενεργειακές απαιτήσεις.

#### $ME\ThetaO\Delta O\Sigma DUAL-PRESSURE LINDE-HAMPSON$

Όπως αναφέρθηκε, το κλάσμα υγροποίησης αυξάνεται με αύξηση του λόγου πίεσης, με μείωση της θερμοκρασίας εισόδου του αερίου τροφοδοσίας πριν την είσοδό του στον κύριο εναλλάκτη, ή με συνδυασμό των δυο. Η μέθοδος που παρουσιάζεται αυξάνει το κλάσμα υγροποίησης, μειώνοντας παράλληλα το απαιτούμενο έργο. Επίτευξη αυτού γίνεται μέσω διπλής συμπίεσης, χρησιμοποιώντας έναν συμπιεστή χαμηλής και έναν υψηλής πίεσης. Υπάρχουν δυο διαχωριστές μετά τον εναλλάκτη, ένας με πίεση μεγαλύτερης της ατμοσφαιρικής και ένας ίση με την ατμοσφαιρική. Αυτές οι συνθήκες πίεσης εξασφαλίζονται με την ύπαρξη στραγγαλιστικών βαλβίδων πριν τους διαχωριστές. Έτσι, τα ρεύματα ατμών και των δυο διαχωριστών συμπεριφέρονται ως ψυκτικά στον εναλλάκτη θερμότητας, ενώ το πρώτο ρεύμα (κορεσμένου) ατμού επιστρέφει στο συμπιεστή υψηλής πίεσης. Με αυτόν τον τρόπο λειτουργεί σαν εξωτερικό ψυκτικό για την πρόψυξη του αερίου τροφοδοσίας. Παράλληλα, το έργο για την πρώτη συμπίεση μειώνεται καθώς ο ρυθμός παροχής μάζας είναι μικρότερος. Τέλος, το κορεσμένο υγρό του πρώτου διαχωριστή, μπορεί να στραγγαλιστεί μέχρι την ατμοσφαιρική πίεση, ή να ψυχθεί περαιτέρω μέσω του κορεσμένου ατμού του δεύτερου διαχωριστή. Τα βήματα της μεθόδου αυτής είναι τα εξής:

- Ισόθερμη συμπίεση στο συμπιεστή χαμηλής (1-2)
- Ισόθερμη συμπίεση στο συμπιεστή υψηλής(2-3)
- Πρόψυξη από τα δυο ρεύματα ατμών των διαχωριστών (3-4)
- Στραγγαλιστική εκτόνωση στην ενδιάμεση πίεση (4-5)
- Στραγγαλιστική εκτόνωση στην ατμοσφαιρική πίεση (6-7)
- Διαχωρισμός του κορεσμένου ατμού από τον πρώτο διαχωριστή (5-8)
- Διαχωρισμός του κορεσμένου ατμού από τον δεύτερο διαχωριστή (7-10)
- Διαχωρισμός του κορεσμένου υγρού από τον πρώτο διαχωριστή (5-6)
- Διαχωρισμός του κορεσμένου υγρού από τον δεύτερο διαχωριστή (7-9)
- Επιστροφή του κορεσμένου ατμού ατμοσφαιρικής πίεσης στο συμπιεστή χαμηλής αφού πρώτα ψύξει μέσω εναλλάκτη στην κατάσταση 3-4 (10-11)
- Επιστροφή του κορεσμένου ατμού στο συμπιεστή υψηλής αφού πρώτα ψύξει μέσω εναλλάκτη στην κατάσταση 3-4 (8-2)



Σχήμα 1.4: Κύκλωμα Dual-pressure Linde-Hampson

Το κλάσμα υγροποίησης δίδεται από τον τύπο:

$$y = \frac{h_1 - h_3}{h_1 - h_9} - \frac{i(h_1 - h_2)}{h_1 - h_9} \quad (1.17)$$

Ο όρος με το αρνητικό πρόσημο δείχνει πως μειώνεται το κλάσμα υγροποίησης, γεγονός το οποίο οφείλεται στην πρώτη εκτόνωση του κορεσμένου ατμού ο οποίος επιστρέφει στο συμπιεστή υψηλής πίεσης, αντί να στραγγαλιστεί στην ατμοσφαιρική πίεση.

Ι είναι ο ρυθμός παροχής ρεύματος ενδιάμεσης πίεσης:

$$i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}} \quad (1.18)$$

και η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ 0.7-0.8.

Ο όρος  $\dot{m}_i$  είναι ρυθμός παροχής μάζας του κορεσμένου ατμού από τον πρώτο διαχωριστή στην ενδιάμεση πίεση, ενώ  $\dot{m}$  είναι ο ολικός ρυθμός παροχής μάζας που περνά από το συμπιεστή υψηλής πίεσης.

Η ενεργειακή απαίτηση δίδεται από τον τύπο:

$$-\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = T_1[(s_1 - s_3) - (h_1 - h_3)] - i[T(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)]$$
(1.19)

Είναι ευδιάκριτο το γεγονός ότι ενώ υπάρχει μείωση του κλάσματος υγροποίησης, ταυτόχρονα μειώνεται και το απαιτούμενο έργο.

#### $ME\ThetaO\Delta O\Sigma SIMPLE CLAUDE$

Με τη μέθοδο αυτή πραγματοποιείται μείωση αυτής θερμοκρασίας του αερίου και μείωση του έργου που απαιτείται για τη συμπίεση, μέσω αυτής στροβίλου. Ο στρόβιλος μειώνει τη θερμοκρασία αυτής μέρους του αερίου, το οποίο χρησιμοποιείται ύστερα για ψύξη του αερίου υψηλής πίεσης. Η αποτόνωση γίνεται αντιστρεπτά και αδιαβατικά. Υπάρχουν τρεις εναλλάκτες θερμότητας. Το ποσοστό του αερίου που πηγαίνει στον στρόβιλο μετά τον πρώτο εναλλάκτη αγγίζει το 60-80%, το οποίο ύστερα αναμειγνύεται στο δεύτερο εναλλάκτη με ρεύμα ατμού που προέρχεται από το διαχωριστή. Τα βήματα αυτής μεθόδου αυτής είναι τα εξής:

- Ισόθερμη συμπίεση (1-2)
- Πρόψυξη από το ρεύμα ατμού του διαχωριστή στον πρώτο εναλλάκτη (2-3)
- Πρόψυξη από το ρεύμα ατμού του διαχωριστή στο δεύτερο εναλλάκτη (3-4)
- Πρόψυξη από το ρεύμα ατμού του διαχωριστή στον τρίτο εναλλάκτη (4-5)
- Ισεντροπική εκτόνωση μέρους του αερίου τροφοδοσίας από στρόβιλο (3-9)
- Στραγγαλιστική εκτόνωση στην ατμοσφαιρική πίεση (5-6)
- Διαχωρισμός του κορεσμένου ατμού από το διαχωριστή (6-8)
- Διαχωρισμός του κορεσμένου υγρού από το διαχωριστή (6-7)
- Επιστροφή του κορεσμένου ατμού από το διαχωριστή για ψύξη στην κατάσταση 4-5 (8-10)
- Ανάμειξη του ρεύματος μετά το στρόβιλο με αυτό του ρεύματος επιστροφής (9-10-11)
- Επιστροφή του ρεύματος για ψύξη στην κατάσταση 3-4 (11-12)
- Επιστροφή του ρεύματος για ψύξη στην κατάσταση 2-3 (12-13)



Σχήμα 1.5: Κύκλωμα Simple Claude

Το κλάσμα υγροποίησης δίδεται από τον τύπο:

$$y = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_7} + \frac{x(h_3 - h_9)}{h_1 - h_7}$$
(1.20)

Με x το κλάσμα της ολικής ροής που διαπερνά το στρόβιλο, ίσο με:

$$x = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}} \qquad (1.21)$$

Η καθαρή ενεργειακή απαίτηση δίδεται από τον τύπο:

$$-\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = \left[T_1\left(s_1 - s_2\right) - \left(h_1 - h_2\right)\right] - x(h_3 - h_9) \quad (1.22)$$

Ο τελευταίος όρος της εξίσωση δείχνει τη μείωση του απαιτούμενου έργου λόγω της εκτόνωσης μέσω του στροβίλου, και είναι ο λόγος για τον οποίο η απόδοση της μεθόδου Simple Claude είναι μεγαλύτερη από της μεθόδου Simple Linde-Hampson.

#### ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΡΙΤΖΑ

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη Simple Claude, μόνο που εδώ αντί για τρεις εναλλάκτες θερμότητας, υπάρχει ένας, ενώ ο πρώτος εναλλάκτης αντικαθίσταται από δυο παράλληλους αναγεννητές. Ο τρίτος εναλλάκτης καταργείται. Οι δυο αναγεννητές λειτουργούν διαδοχικά μέσω βαλβίδας, αφήνοντας πότε να περάσει το ρεύμα χαμηλής και πότε το ρεύμα υψηλής πίεσης. Ο ρόλος του πρώτου αναγεννητή είναι να καθαρίζει και να ψύχει το εισερχόμενο ρεύμα. Ο δεύτερος, από τον οποίο επιστρέφει το αέριο χαμηλής πίεσης, είναι υπεύθυνος στο να διατηρήσει την κρύα κατάστασή του.

Τα βήματα της μεθόδου αυτής είναι τα εξής:

- Ισόθερμη συμπίεση (1-2)
- Πρόψυξη από το αέριο επιστροφής στους δυο αναγεννητές (2-3)
- Πρόψυξη από το αέριο επιστροφής στον εναλλάκτη θερμότητας (3-4)
- Ισεντροπική εκτόνωση μέρους του αερίου τροφοδοσίας από στρόβιλο (3-7)
- Στραγγαλιστική εκτόνωση στην ατμοσφαιρική πίεση (4-5)
- Διαχωρισμός του κορεσμένου ατμού από το διαχωριστή (5-8)
- Διαχωρισμός του κορεσμένου υγρού από το διαχωριστή (5-6)
- Ανάμειξη του ρεύματος μετά το στρόβιλο με αυτό του κορεσμένου ατμού του διαχωριστή (7-8-9)
- Επιστροφή του ρεύματος για ψύξη στην κατάσταση 3-4 (9-10)
- Επιστροφή του ρεύματος διαμέσου του αναγεννητή για ψύξη στην κατάσταση 2-3 (10-11)

#### Η διαδικασία παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.6: Κύκλωμα Kapitza

Η ύπαρξη αναγεννητών απαιτεί λειτουργία σε χαμηλές πιέσεις. Οι εξισώσεις που δίνουν το κλάσμα υγροποίησης και τις ενεργειακές απαιτήσεις είναι ίδιες με αυτές της μεθόδου Simple Claude.

# ΜΕΘΟΔΟΣ DUAL PRESSURE CLAUDE

Η μέθοδος αυτή είναι ουσιαστικά βελτιωμένη εκδοχή της Simple Claude, χρησιμοποιώντας παρόμοια λογική με αυτή της μεθόδου Dual Pressure Linde-Hampson. Χρησιμοποιούνται δυο συμπιεστές και τρεις εναλλάκτες θερμότητας. Μετά τον πρώτο συμπιεστή ενδιάμεσης πίεσης γίνεται διαχωρισμός του ρεύματος σε δυο μέρη. Το ένα ρεύμα συμπιέζεται εκ νέου σε συμπιεστή υψηλής πίεση και το δεύτερο συνεχίζει κανονικά, ενώ και τα δυο διαπερνούν ξεχωριστά εναλλάκτη θερμότητας για πρόψυξη. Το ρεύμα υψηλής πίεσης περνά τους εναλλάκτες και μετά το στραγγαλισμό φτάνει στο διαχωριστή, ενώ το ρεύμα ενδιάμεσης εκτονώνεται σε πίεση περιβάλλοντος προς μείωση της θερμοκρασίας του. Το ρεύμα αυτό αφού περάσει τους δυο εναλλάκτες καταλήγει στον πρώτο συμπιεστή. Ο κορεσμένος ατμός του διαχωριστή, αφού συμβάλλει στην ψύξη μέσω του τρίτου εναλλάκτη, αναμειγνύεται με το ρεύμα εξόδου του στροβίλου και τελικά καταλήγει στην αρχή με ανάμειξη make-up αερίου. Τα βήματα της μεθόδου αυτής είναι τα εξής:

- Ισόθερμη συμπίεση στο συμπιεστή χαμηλής πίεσης (1-2)
- Εκτόνωση μέρους του αερίου ενδιάμεσης πίεσης και ψύξη του (2-11-10)
- Ισόθερμη συμπίεση στο συμπιεστή υψηλής πίεσης (2-3)
- Πρόψυξη με το ρεύμα εξόδου του στροβίλου και του κορεσμένου ατμού του διαχωριστή (3-4)
- Στραγγαλιστική εκτόνωση στην ατμοσφαιρική πίεση (6-7)
- Διαχωρισμός του κορεσμένου ατμού από το διαχωριστή (7-9)
- Διαχωρισμός του κορεσμένου υγρού από το διαχωριστή (7-8)
- Συμβολή στην ψύξη μέσω εναλλάκτη από τον κορεσμένο ατμό του διαχωριστή στην κατάσταση 5-6 (9-11)
- Ανάμειξη του ρεύματος εξόδου του στροβίλου με τον κορεσμένο ατμό του διαχωριστή (10-12)
- Ψύξη του ρεύματος ανάμειξης μέσω των εναλλακτών στις καταστάσεις 4-5,3-4 και
  2-11 (12-13-15)



Σχήμα 1.7: Κύκλωμα Dual pressure Claude

Με τη μέθοδο αυτή μειώνεται σημαντικά το έργο για υγροποίηση και συμπίεση.

Η ενεργειακή απαίτηση δίδεται από τον τύπο:

$$-\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = \left[T_1\left(s_1 - s_3\right) - (h_1 - h_3)\right] - x\left[T_1(s_2 - s_3) - (h_2 - h_3) + (h_{14} - h_{10})\right]$$
(1.23)

Με εφαρμογή του Πρώτου Νόμου Θερμοδυναμικής στους εναλλάκτες, το στρόβιλο και το διαχωριστή προκύπτει το κλάσμα υγροποίησης:

$$y = \frac{h_{14} - h_3}{h_{14} - h_8} + \frac{x(h_4 - h_{10} + h_3 - h_2)}{h_{14} - h_8}$$
(1.24)

#### ΜΕΘΟΔΟΣ ΗΕΥLANDT

Βασίζεται στη μέθοδο Dual Pressure Claude, όμως εδώ το αέριο συμπιέζεται μέχρι την υπερκρίσιμη πίεσή του και το ρεύμα εξόδου του στροβίλου βρίσκεται σε θερμοκρασία πολύ μεγαλύτερη από αυτή του σημείου δρόσου του στην ενδιάμεση υποκρίσιμη πίεση με τη βέλτιστη τιμή της θερμοκρασίας πριν την εκτόνωση να είναι κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έτσι ο πρώτος εναλλάκτης θερμότητας παραλείπεται. Η συμπίεση γίνεται αρχικά στα 200 bar μέσω δυο συμπιεστών υψηλής και χαμηλής πίεσης. Έπειτα ένα μέρος του αερίου τροφοδοσίας ψύχεται στον εναλλάκτη, ενώ το υπόλοιπο εκτονώνεται στην ενδιάμεση πίεση των 5 bar και επιστρέφει στο συμπιεστή υψηλής, αφού πρώτα συμβάλλει στην ψύξη του κύριου αερίου τροφοδοσίας μέσω εναλλάκτη. Το αέριο τροφοδοσίας καταλήγει στο διαχωριστή, αφού πρώτα διαπεράσει και δεύτερο εναλλάκτη και στραγγαλιστεί. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για υγροποίηση αέρα υψηλής πίεσης.

Τα βήματα της μεθόδου αυτής είναι τα εξής:

- Ισόθερμη συμπίεση στους συμπιεστές χαμηλής και υψηλής πίεσης (1-2)
- Ψύξη μέρους του αερίου μέσω εναλλάκτη (2-3-4)
- Αδιαβατική εκτόνωση του υπολοίπου σε ενδιάμεση πίεση (2-9)
- Ανάμειξη του ρεύματος εξόδου του στροβίλου με το ρεύμα από το διαχωριστή για ψύξη μέσω εναλλάκτη στην κατάσταση 2-3 (9-8-10)
- Στραγγαλιστική εκτόνωση στην ατμοσφαιρική πίεση (4-5)
- Διαχωρισμός του κορεσμένου ατμού από το διαχωριστή (5-7)
- Διαχωρισμός του κορεσμένου υγρού από το διαχωριστή (5-6)
- Ψύξη μέσω εναλλάκτη από τον κορεσμένο ατμό του διαχωριστή στην κατάσταση 3-4 (7-8)



Σχήμα 1.8: Κύκλωμα Heylandt

Το κλάσμα υγροποίησης δίδεται από τον τύπο:

$$y = \frac{h_1 - h_3}{h_1 - h_6} + \frac{x(h_3 - h_9)}{h_1 - h_6}$$
(1.25)

Ενώ η ενεργειακή απαίτηση είναι:

$$-\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = \left[T_1\left(s_1 - s_3\right) - (h_1 - h_3)\right] - x\left\{\left[T_1\left(s_2 - s_3\right) - (h_1 - h_2)\right] + (h_3 - h_9)\right\}$$
(1.26)

# 1.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕΘΑΝΙΟΥ-ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Το μεθάνιο είναι το βασικό στοιχείο του φυσικού αερίου σε ποσοστό άνω του 90% κατ'όγκο, με τα υπόλοιπα να είναι το αιθάνιο και το προπάνιο. Η τέλεια καύση σε συνδυασμό με την πολύ μικρή εκπομπή μονοξειδίου του άνθρακα και λοιπών υδρογονανθράκων καθιστούν το φυσικό αέριο ένα πολύ καλό καύσιμο. Σαν καύσιμο απαντάται ως συμπιεσμένο φυσικό αέριο (CNG) ή σαν υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG). Στη CNG μορφή, λόγω του ότι είναι ελαφρύ αέριο, είναι απαραίτητη η συμπίεσή του σε πολύ μεγάλες πιέσεις, της τάξεως των 250 atm. Στην LNG μορφή, η απαιτούμενη συμπίεση είναι μικρότερη (60-80 atm), όμως χρειάζεται κατάλληλη μόνωση. Το κανονικό σημείο βρασμού του φυσικού αερίου είναι στους -162°C. Η υγροποίηση του φυσικού αερίου είναι οικονομικά βιώσιμη μόνο για μεταφορά του σε μεγάλες αποστάσεις (πάνω από 2500 χιλιόμετρα).[2]

# MEΘΟΔΟΣ CASCADE ME ΚΑΘΑΡΟ ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ ΩΣ ΨΥΚΤΙΚΟ (PCR-Pure Component Refrigeration)

Η πρώτη απόπειρα για υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) έγινε το 1939, με την κατασκευή εργοστασίου το οποίο χρησιμοποιούσε σαν ψυκτικό αμμωνία, βασισμένο σε σύστημα cascade. Παρόμοια εγκατάσταση μεταγενέστερα (1948), χρησιμοποίησε εκτός της αμμωνίας, αιθυλένιο και μεθάνιο. Σημείο αναφοράς υπήρξε ο σχεδιασμός διαδικασίας υγροποίησης από τον Morrison το 1954, όπου περιείχε στρόβιλο για αποτόνωση. Το φυσικό αέριο συμπιεζόταν αρχικά στα 70 bar, δεχόταν πρόψυξη μέχρι τους -60° C και αποτονώταν μέσω στροβίλου μέχρι πίεση 1 atm. Η απλή αυτή διαδικασία είχε όμως δυσκολίες διαχωρισμού του νερού. Με την κατασκευή μεγάλου υγροποιητή το 1963 υπήρχε επανεκίννηση της διαδικασίας PCR, χρησιμοποιώντας προπάνιο, αιθάνιο και μεθάνιο σαν ψυκτικά.



Σχήμα 1.9: Κύκλωμα PCR

# MEΘΟΔΟΣ CASCADE ME MEIΓMA ΩΣ ΨΥΚΤΙΚΟ (MCR-Multi Component Refrigerant)

Η χρησιμοποίηση μείγματος ως ψυκτικού εμφανίστηκε το 1947, ενώ συγκεκριμένα για υγροποίηση φυσικού αερίου το 1959 σε Αμερική και Πρώην Σοβιετική Ένωση και το 1967 στη Γαλλία. Το μείγμα στοχεύει στο να εξάγει τα διαφορετικά στοιχεία που αποτελούν το φυσικό αέριο, διαλύοντάς τα με άζωτο, σε αναλογίες που ορίζονται από τη σύσταση του φυσικού αερίου τροφοδοσίας. Η σύσταση των στοιχείων αυτών βελτιστοποιείται ώστε το μείγμα ως ψυκτικό μέσο να χρησιμοποιηθεί για συμπύκνωση, διαχωρισμό υγρού-ατμού παρέχοντας ψύξη στο αέριο τροφοδοσίας, και τέλος εξάτμιση των κλασμάτων υγρού του ίδιου του ψυκτικού. Η διαδικασία αυτή γίνεται με τρόπο τέτοιο ώστε η θερμοκρασία να μειώνεται σταδιακά και να παρέχει την απαραίτητη ψύξη για κάθε στάδιο της διαδικασίας ψύξης, μέχρι να συμπυκνωθεί πλήρως ο ατμός του MCR. Με αυτόν τον τρόπο ψύχεται το αέριο τροφοδοσίας του MCR. Επομένως με αυτή τη διαδικασία είναι αχρείαστοι οι συμπιεστές που σήταν απαραίτητοι για ψυκτικά καθαρού συστατικού της μεθόδου PCR.

Η μέθοδος MCR χρησιμοποιεί 4 εναλλάκτες θερμότητας και 3 διαχωριστές φάσης, ψύκτη και φυγοκεντρικό συμπιεστή. Το αέριο ψύχεται μέσω των εναλλακτών σε πίεση 39-53 atm χρησιμοποιώντας κλάσματα υγρού και ατμού από το MCR σε διαδοχικά στάδια διαχωρισμού φάσης. Αρχικά το ατμώδες MCR συμπιέζεται μέσω μονοβάθμιου φυγοκεντρικού συμπιεστή και μέρος αυτού συμπυκνώνεται από τον ψύκτη. Έπειτα στον πρώτο διαχωριστή γίνεται διαχωρισμός υγρού-ατμού, τα οποία και διαρρέουν ξεχωριστά τον πρώτο εναλλάκτη. Ακολουθεί στραγγαλιστική εκτόνωση του υγρού μέρους, το οποίο αναμειγνύεται με αυτό που επιστρέφει από το δεύτερο εναλλάκτη σε ίδια πίεση, και μαζί διαρρέουν το κέλυφος του πρώτου εναλλάκτη παρέχοντας ψύξη στο διερχόμενο αέριο. Συμπύκνωση γίνεται μερικώς και στο αέριο μέρος τογ MCR στον πρώτο εναλλάκτη, και το υπόλοιπο καταλήγει στο δεύτερο διαχωριστή. Η διαδικασία παραμένει ίδια, το υγρό μέρος του MCR από το δεύτερο διαχωριστή εκτονώνεται, αναμειγνύεται με την επιστροφή του τρίτου εναλλάκτη και παρέχει ψύξη διαρρέοντας το κέλυφος του δεύτερου εναλλάκτη. Όμοια η διαδικασία από τον τρίτο διαχωριστή και έπειτα, στον τέταρτο διαχωριστή, όπου πέραν αυτού το αέριο έχει υγροποιηθεί πλήρως, και το προϊόν (LNG) αποθηκεύεται σε δεξαμενή με κατάλληλη πίεση.

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, παρατηρείται σταδιακή πτώση της θερμοκρασίας του MCR, καθώς στο υγρό ρεύμα αποβάλλεται το βαρύ προπάνιο και προστίθεται το ελαφρύ μεθάνιο. Το αέριο τροφοδοσίας αποτελείται από μεθάνιο σε ποσοστό 90%, ενώ το υπόλοιπο μοιράζεται σε αιθάνιο, προπάνιο και άζωτο. Επειδή τα στοιχεία αυτά συμπυκνώνονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, είναι απαραίτητο ανάμεσα στα ρεύματα που διαρρέουν της εναλλάκτες να διατηρείται μια ομοιόμορφη θερμοκρασιακή διαφορά, άρα και προσεκτική επιλογή της σύστασης του MCR.



Σχήμα 1.10: Κύκλωμα MCR

# 1.5 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΝΕΟ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΟΝΟ

Όπως έχει αναφερθεί, είναι αδύνατη η υγροποίηση του νέου, ηλίου και υδρογόνου χωρίς πρόψυξη καθώς η μέγιστη θερμοκρασία αναστροφής τους είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για την υγροποίησή τους, είναι απαραίτητη η αφαίρεση πτητικών προσμείξεων ίχνους από το αέριο τροφοδοσίας, όπως άζωτο, οξυγόνο και μεθάνιο. Ιδιαίτερα δύσκολη περίπτωση είναι η υγροποίηση του υδρογόνου, λόγω δυο ισοτόπων του, τα οποία βρίσκονται σε ισορροπία σε χαμηλές θερμοκρασίες, το όρθο και το πάρα υδρογόνο. Σε θερμοκρασία δωματίου, το διατομικό υδρογόνο περιέχει 25% πάρα υδρογόνο, το οποίο γίνεται 100% σε θερμοκρασία 20 Κ. Εφόσον απαιτείται αποθήκευση υγρού υδρογόνου, χρειάζεται να μετατραπεί σε πάρα υδρογόνο, λόγω απελευθέρωσης εξώθερμης θερμότητας της αντιδράσεως. Η μετατροπή είναι εξώθερμη και πολύ αργή, οπότε και είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση μεταλλικών καταλυτών. [5]

# ΜΕΘΟΔΟΣ PRE-COOLED LINDE-HAMPSON

Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για υγροποίηση νέου και υδρογόνου σε μεγέθη εργαστηρίου. Ο πρώτος υγροποιητής υδρογόνου που βασίστηκε σε αυτή τη διαδικασία ήταν ο Boulder, που πήρε το όνομά του από την περιοχή Boulder στην οποία ήταν το εργαστήριο που τον κατασκεύασε. Για νέο και υδρογόνο σαν ψυκτικό χρησιμοποιείται το

άζωτο. Για μικρής κλίμακας υγροποίηση μπορεί να παρθεί αυτούσιο υγρό άζωτο, ενώ για μεγάλης κλίμακας είναι απαραίτητη εγκατάσταση υγροποίησής του. Η διαδικασία ξεκινά με συμπίεση του αερίου τροφοδοσίας στα 100 bar και πρόψυξή του από τα ρεύματα ατμών του αζώτου και του μετέπειτα υδρογόνου. Το ρεύμα αερίου αζώτου προκύπτει από την απελευθέρωση ατμού στο λουτρό υγρού αζώτου, ενώ του υδρογόνου προέρχεται από το διαχωριστή. Η ψύξη του αερίου συνεχίζεται μέσω λουτρού υγρού αζώτου στα 66 K και 0.2 bar. Το αέριο δέχεται μέσω εναλλάκτη περαιτέρω ψύξη από το ρεύμα ατμού του υδρογόνου που επιστρέφει από το διαχωριστή και έπειτα δέχεται στραγγαλιστική εκτόνωση. [5]



Σχήμα 1.11: Κύκλωμα Pre-cooled Linde-Hampson

Το κλάσμα υγροποίησης δίδεται από τον τύπο:

$$y = \frac{h_7 - h_4}{h_7 - h_f} \qquad (1.27)$$

Εφαρμόζοντας θερμική ισορροπία στους εναλλάκτες, στο λουτρό αζώτου, στο διαχωριστή προκύπτει:

$$\dot{m}_{N_2}h_c + (\dot{m} - \dot{m}_f)h_1 + \dot{m}_jh_f = \dot{m}_{N_2}h_a + \dot{m}h_2 \qquad (1.28)$$

Με  $\dot{m}_{N_2}$  παροχή μάζας αερίου αζώτου που προέκυψε από το λουτρό υγρού,  $\dot{m}$  παροχή μάζας υδρογόνου ή νέου που εισέρχεται στο συμπιεστή και  $\dot{m}_f$  παροχή μάζας του υγρού που προέκυψε στο διαχωριστή.

Ο ρυθμός μετατροπής υγρού σε αέριο άζωτο ανά μονάδα μάζας υδρογόνου ή νέου που εισέρχεται στο συμπιεστή δίδεται από τον τύπο:

$$z = \frac{\dot{m}_{N_2}}{\dot{m}} \qquad (1.29)$$

ή

$$z = \frac{h_2 - h_1}{h_c - h_a} + y \cdot \frac{h_2 - h_f}{h_c - h_a} \quad (1.30)$$

Η ενεργειακή απαίτηση δίδεται από τον τύπο:

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2) \quad (1.31)$$

#### MEΘOΔOΣ PRE-COOLED CLAUDE [5]

Η υγροποίηση του νέου και του υδρογόνου μπορεί να προκύψει χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Simple Claude, καθώς η μέθοδος αυτή δε βασίζεται τόσο στο στραγγαλισμό όσο στην ψύξη μέσω εναλλάκτη από το ρεύμα εξόδου του στροβίλου. Χρησιμοποιώντας στους πρόψυξη η απόδοση στους μεθόδου αυξάνει σημαντικά, ενώ σε σχέση με τη μέθοδο Precooled Linde-Hampson είναι κατά 50-75% μεγαλύτερη. Η βασική στους αρχή είναι ίδια με τη Simple Claude, μόνο που εδώ στους και στην προηγούμενη μέθοδο συμβαίνει πρόψυξη του αερίου τροφοδοσίας μέσω λουτρού υγρού αζώτου. Το υγρό άζωτο βρίσκεται σε πίεση 1 bar αρχικά και έπειτα στα 0.14 bar. Το ρεύμα ατμού υδρογόνου που παρέχει ψύξη μέσω εναλλάκτη βρίσκεται σε πίεση 7 bar, ενώ η ψύξη πριν το στραγγαλισμό προκύπτει από τη μείωση θερμοκρασίας ρεύματος μέσω αποτόνωσης από στρόβιλο σε πίεση 1 bar στους 36 K, το οποίο μετά εισέρχεται σε εναλλάκτη ώστε να ψύξει το αέριο τροφοδοσίας. Ο κορεσμένος ατμός που προέρχεται από το διαχωριστή παρέχει ψύξη μεταξύ 20-30 K. Η διαδικασία παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



# Σχήμα 1.12: Κύκλωμα Pre-cooled Claude

# MEΘΟΔΟΣ HELIUM-PRECOOLED CLAUDE [5]

Ουσιαστικά είναι η προηγούμενη μέθοδος, προσθέτοντας επιπλέον πρόψυξη μέσω ήλιου ως ψυκτικού. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται το απαιτούμενο έργο για τη συμπίεση, της δε μπορεί να αποφευχθεί η ύπαρξη τριών συμπιεστών, της για κάθε στοιχείο (υδρογόνο, άζωτο, ήλιο). Η διαδικασία είναι όμοια με πριν, ενώ το ήλιο ψύχει το αέριο τροφοδοσίας μέσω εναλλάκτη πριν το στραγγαλισμό. Στο λουτρό υγρού αζώτου ψύχεται αέριο ήλιο και δέχεται επιπλέον ψύξη από το ρεύμα επιστροφής του. Τέλος ψύχεται μέσω στροβίλου πριν εισέλθει στον τελευταίο εναλλάκτη, ώστε να ψύξει το αέριο τροφοδοσίας. Με αυτή τη μέθοδο η πίεση που χρειάζεται το αέριο τροφοδοσίας είναι πολύ μικρή, της τάξεως των 3-8 atm και 10 atm για το ήλιο. Η ψύξη του ηλίου βασίζεται στη μέθοδο Claude. Δεν πραγματοποιείται συμπύκνωση ηλίου στη διαδικασία, παρά μόνο ψύξη του σε θερμοκρασία μικρότερη της θερμοκρασίας του υδρογόνου.



Σχήμα 1.13: Κύκλωμα Helium-precooled Claude

## ΜΕΘΟΔΟΣ PHILIPS HYDROGEN

Για υγροποίηση υδρογόνου χρησιμοποιείται διβάθμιος ψύκτης Philips. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί διβάθμιος κύκλος Stirling με εργαζόμενο μέσο αέριο ήλιο, με τον πρώτο ψύκτη να αποτελεί τον ψύκτη του δεύτερου. Χρησιμοποιείται για υγροποίηση σε εργαστηριακή κλίμακα. Υδρογόνο αέριο στα 8 bar δίνει σαν προϊόν 5.5 λίτρα/ώρα με κατανάλωση 11 kW. Η υγροποίηση του υδρογόνου γίνεται σε 40 λεπτά, δείχνοντας την αποτελεσματικότητα του κύκλου Stirling.

# 1.6 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΗΛΙΟ

Η πρώτη πετυχημένη υγροποίηση ηλίου έγινε από τον Kammerling Onnes το 1908 στο Leiden της Ολλανδίας. Ο πρώτος εμπορικός υγροποιητής ηλίου κατασκευάστηκε από τον Collins το 1950. Η θερμοκρασία αναστροφής του ηλίου είναι στα 40 K, οπότε είναι απαραίτητη η πρόψυξή του κάτω από 20 K για να είναι σημαντική η ποσότητα που υγροποιείται μετά το στραγγαλισμό. Επίσης, για την απομάκρυνση της αισθητής θερμότητας μέχρι το σημείο δρόσου, απαιτείται ψύξη μεγάλης κλίμακας, καθιστώντας ιδιαίτερα δύσκολη την υγροποίηση του ηλίου. Ακόμα, απαιτείται προσεκτική επιλογή υλικών για τη διαδικασία υγροποίησης, καθώς τα μέταλλα έχουν πολύ χαμηλή ειδική θερμότητα κάτω από τους 20 K. Τέλος είναι δύσκολη η εύρεση ψυκτικού μέσου για θερμοκρασίες κάτω των 14 K, όπου εκεί είναι το τριπλό σημείο του υδρογόνου, ενώ η κρίσιμη θερμοκρασία του ηλίου είναι πολύ χαμηλή, στους 5.2 K.

# ΜΕΘΟΔΟΣ PRE-COOLED LINDE-HAMPSON HELIUM

Στη μέθοδο αυτή το αέριο ήλιο συμπιέζεται σε πίεση 30 atm, ενώ η πρόψυξή του γίνεται με συνδυασμό των αζώτου (αέριο και υγρό), υγρού υδρογόνου και του ατμού του που προκύπτει στο διαχωριστή. Ο στραγγαλισμός γίνεται σε πίεση 1 atm.

# ΜΕΘΟΔΟΣ COLLINS HELIUM

Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στη μέθοδο Claude. Χρησιμοποιεί 3-5 στροβίλους και 5-7 εναλλάκτες θερμότητας, ανάλογα με την πίεση εισόδου, ώστε να αφαιρεθεί η αισθητή θερμότητα από το αέριο τροφοδοσίας (πέρα από τη χρήση του αζώτου). Το συμπιεσμένο αέριο ήλιο (12 atm) εκτονώνεται μέσω στροβίλων πριν στραγγαλιστεί, παρέχοντας ψύξη μέσω εναλλακτών στο αέριο τροφοδοσίας. Με τη μέθοδο αυτή μπορεί να παραλειφθεί η χρήση του λουτρού αζώτου για πρόψυξη. [1]

- Ισόθερμη συμπίεση (1-2)
- Πρόψυξη του αερίου από το ρεύμα επιστροφής μέσω του πρώτου εναλλάκτη (2-3)
- Πρόψυξη μέρους του αερίου από το ρεύμα εξόδου του πρώτου στροβίλου μέσω του δεύτερου εναλλάκτη (3-4)
- Εκτόνωση του υπολοίπου μέρους σε πίεση 1 atm και είσοδο στο δεύτερο εναλλάκτη (3-e1)
- Πρόψυξη του αερίου στον τρίτο εναλλάκτη (4-5)
- Εκτόνωση μέρους του αερίου και είσοδο στον τέταρτο εναλλάκτη (5-e2)
- Ψύξη του υπολοίπου μέρους στον τέταρτο εναλλάκτη
- Ψύξη στον πέμπτο εναλλάκτη (6-7)
- Στραγγαλιστική εκτόνωση σε πίεση 1 atm (7-8)
- Επιστροφή του ατμού (9-1)



Σχήμα 1.14: Κύκλωμα Pre-cooled Linde-Hampson Helium

Εφαρμόζοντας ενθαλπική ισορροπία στους εναλλάκτες, το κλάσμα υγροποίησης δίδεται από τον τύπο:

$$y = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_f} + x_1 \frac{\Delta h_{e1}}{h_1 - h_f} + x_2 \frac{\Delta h_{e2}}{h_1 - h_f}$$
(1.32)

με  $\Delta h_e$ =Διαφορά ενθαλπίας στο στρόβιλο και

x=κλάσματα συμπιεσμένης μάζας που περνούν από το στρόβιλο

Η ενεργειακή απαίτηση είναι:

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = [T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)] - x_1[(h_3 - h_{e1}) - x_2(h_5 - h_{e2})]$$
(1.33)

#### ΜΕΘΟΔΟΣ PHILIPS HELIUM

Περιλαμβάνει διβάθμια εκτόνωση του αερίου και στραγγαλιστική βαλβίδα με σύστημα εκτίναξης. Είναι παρόμοια με την Dual Pressure Linde-Hampson με το σύστημα εκτίναξης να αντικαθιστά το συμπιεστή χαμηλής πίεσης. Ο ρόλος του συστήματος εκτίναξης είναι να επιτρέπει τη δημιουργία υγρού μετά τη βαλβίδα ενώ παράλληλα να αυξάνει την πίεση του ρεύματος επιστροφής υπερκαλύπτοντας την πτώση πίεσης στον εναλλάκτη. Το αέριο τροφοδοσίας δέχεται πρόψυξη από ρεύμα ηλίου το οποίο δέχεται στραγγαλιστική εκτόνωση.

#### ΜΕΘΟΔΟΣ SULZER HELIUM

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για υγροποίηση σε μεγάλες ποσότητες, της τάξεως των 800 litre/h. Αρχικά υπάρχει συμπίεση μεγάλου ποσοστού του αερίου σε πίεση 8.6 atm, πρόψυξή του μέσω υγρού αζώτου σε θερμοκρασία 81 K, και εκτόνωσή του, ώστε το αέριο να φτάσει τους 10 K. Το υπόλοιπο αέριο συμπιέζεται σε πίεση 16.2 atm και δέχεται πρόψυξη από το υγρό άζωτο στους 81 K, ενώ μέσω των εναλλακτών ψύχεται μέχρι τους 10.2 K. Το αέριο αυτό ψύχεται επιπλέον από τα ρεύματα επιστροφής και στραγγαλίζεται σε πίεση 4 atm και θερμοκρασία 5.9 K, ενώ περνώντας από τον τελευταίο εναλλάκτη η θερμοκρασία του φτάνει στους 5.6 K και δέχεται στραγγαλισμό σε πίεση 1.25 atm. Το υγρό προϊόν διαχωρίζεται από τον κορεσμένο ατμό στο διαχωριστή, ενώ ο ατμός επιστρέφει στους εναλλάκτες.



Σχήμα 1.15: Κύκλωμα Sulzer Helium

### ΜΕΘΟΔΟΣ SIMON-HELIUM

Είναι για υγροποίηση σε εργαστηριακή κλίμακα. Περιλαμβάνει ένα σωλήνα υψηλής πίεσης με τρεις ομόκεντρους σωλήνες μέσα του. Οι σωλήνες αυτοί περιέχουν αέριο ήλιο σε υψηλή πίεση 50 atm και ψύχονται διαδοχικά από υγρό άζωτο και υγρό υδρογόνο. Το αέριο απομονώνεται με εφαρμογή του κενού, και εκτονώνεται σε ατμοσφαιρική πίεση όταν ο μισός σωλήνας γεμίσει με υγρό ήλιο.

Τα βήματα της μεθόδου αυτής είναι τα εξής:

- Εισαγωγή του αέριου ηλίου στο εσωτερικό του δοχείου σε πίεση 100 atm και θερμοκρασία 300 K (1-2)
- Εισαγωγή του υγρού αζώτου στο δοχείο Dewar ψύχοντάς το σε θερμοκρασία 77 Κ.
  Ο χώρος μεταξύ του δοχείου που περιέχει το υγρό άζωτο με τους υπόλοιπους σωλήνες γεμίζει με αέριο ήλιο σε πίεση 1 atm διευκολύνοντας τη μεταφορά θερμότητας (2-3)
- Εισαγωγή του υγρού αζώτου στα ενδότερα του δοχείου τη στιγμή που το ήλιο και ο σωλήνας που το περιέχει ψυχθούν στη θερμοκρασία υγρού αζώτου (20.4 K) (3-4)
- Εφόσον φτάσουν σε αυτή τη θερμοκρασία, μείωση της πίεσης πάνω από το υγρό υδρογόνο σε 1.7 mm Hg για περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας στους 10 K (4-5)
- Μείωση της πίεσης του δοχείου ηλίου ώστε να απελευθερωθεί ήλιο στη δεξαμενή αερίου.



Σχήμα 1.16: Κύκλωμα Simon-helium



Σχήμα 1.17: Διάγραμμα T-s μεθόδου Simon

Κάνοντας την παραδοχή ότι δεν υπάρχει εξωτερική μεταφορά θερμότητας από το περιβάλλον στο εσωτερικό του σωλήνα, προκύπτει ότι η διαφορά εντροπίας μεταξύ του σωλήνα και του αέριου ηλίου δίνεται από τη διαφορά των εντροπιών των ρευμάτων εισόδου-εξόδου:

Το κλάσμα υγροποίησης δίδεται από τον τύπο:

$$y = \frac{\left(s_g - s_5\right) + \left(\frac{m_c}{m_6}\right)\Delta_{s_c}}{s_g - s_f}$$
(1.34)

Με δείκτη c συμβολίζεται το εσωτερικό του σωλήνα. m<sub>6</sub> είναι η ολική μάζα ηλίου που παραμένει στο σωλήνα μετά την εκτόνωση.

Όπου  $\varDelta_{s_c}$ η μεταβολή εντροπίας στο δοχείο, η οποία δίνεται από τον τύπο Debye:

$$\Delta_{S_c} = -\frac{77.93R_c \left(T_s^3 - T_f^3\right)}{\theta_D^3} \qquad (1.35)$$

Με  $\theta_D$  θερμοκρασία Debye που δίδεται για διάφορα μέταλλα.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΡΥΟΓΟΝΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ

Βασικό μέλημα μιας διαδικασίας υγροποίησης είναι η επιλογή των κατάλληλων στοιχείων. Με τον όρο κατάλληλων εννοούνται εκείνες οι ιδιότητες που διέπουν ένα στοιχείο, ώστε όχι μόνο να διευκολύνουν τη διαδικασία, αλλά και να αποτελούν σημείο αναφοράς ώστε να χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλες συσκευές, να εξασφαλιστούν οι κατάλληλες συνθήκες. Ειδικότερα σε συνθήκες πολύ χαμηλών θερμοκρασιών, η συμπεριφορά των ιδιοτήτων των στοιχείων διαφέρει σημαντικά σε σχέση με χρησιμοποίησή τους στις κανονικές. Στο παρών κεφάλαιο θα εξεταστούν οι ιδιότητες των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στον τομέα της κρυογονικής.

### 2.1 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Οι ιδιότητες αυτές δε μεταβάλλουν τη συμπεριφορά τους σε κρυογονικές συνθήκες, δηλαδή οι πυκνότητες και οι πιέσεις παραμένουν κοντινές με αυτές σε κανονικές συνθήκες. Η διαφορά που παρατηρείται αφορά στο διάγραμμα φάσεων πίεσης-θερμοκρασίας σε καθαρές ουσίες, όπου εδώ το κρίσιμο και το τριπλό σημείο είναι πιο κοντά σε σχέση με τις κανονικές ουσίες

Για τον υπολογισμό της πίεσης μερικών καθαρών κρυογονικών υγρών μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω σχέση, με  $C_1, C_2$  και  $C_3$  σταθερές.

$$\ln P^{s} = C_{1} - \frac{C_{2}}{T} - C_{3} \ln T \qquad (2.1)$$

Mε  $P^s$  σε atm και T σε K.

Όσον αφορά την ειδική θερμότητα, αυτή μειώνεται με μείωση της θερμοκρασίας. Σε χαμηλές πιέσεις, μειώνεται μαζί με τη θερμοκρασία, ενώ είναι ανεξάρτητη των μεταβολών της πίεσης. Στις υψηλές πιέσεις παρατηρείται μέγιστο στην καμπύλη της κοντά στην περιοχή του κρίσιμου σημείου. Για τη διαδικασία υγροποίησης ηλίου και υδρογόνου κυρίαρχη παράμετρος αποτελεί η μεταβολή της ειδικής θερμότητας στο θερμοκρασιακό εύρος των 30-255 K, καθώς επηρεάζει άμεσα την αποτελεσματικότητα των εναλλακτών θερμότητας.

#### ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ ΣΕ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΤΜΟΥ-ΥΓΡΟΥ

#### ΟΞΥΓΟΝΟ-ΑΖΩΤΟ-ΑΡΓΟ

Τα διμερή μείγματα συμπεριφέρονται σαν κανονικά συστήματα. Στο υγρό μείγμα με 79% άζωτο και 21% οξυγόνο, σε πίεση μιας ατμόσφαιρας, η σύσταση ισορροπίας στην ατμώδη φάση είναι 93% άζωτο και 7% οξυγόνο. Δηλαδή, αν εισαχθεί υγρός αέρας στη στήλη διόρθωσης χωρίς αντιρροή υγρού αζώτου, θα διαφύγει ρεύμα ατμού πλούσιο σε οξυγόνο, το οποίο περιείχε αρχικά ο υγρός αέρας στην εισαγωγή. Για αυτό το λόγο το υγρό εισάγεται στη μέση περιοχή με αντιρροή. Επομένως, οι συνθέσεις ισορροπίας είναι απαραίτητες κάθε φορά για τη διαδικασία, τόσο στον καθορισμό των διαφόρων συνθηκών, όσο και στον αριθμό των απαιτούμενων φάσεων στη στήλη διόρθωσης και στη διακίνηση των προϊόντων.

# ΑΖΩΤΟ-ΗΛΙΟ

Το σύστημα αυτό είναι διαφορετικό από το προηγούμενο, καθώς απέχουν πολύ τα σημεία βρασμού του αζώτου με του ηλίου, οπότε ο διαχωρισμός τους είναι εύκολος. Οι συνθέσεις ισορροπίας τους είναι σημαντικές για την επιλογή του συστήματος συμπύκνωσης και εξάτμισης. Από τα παρακάτω διαγράμματα, παρατηρείται πως, αν σε πίεση 20 atm, αέριο μείγμα συνθέσεως 80% αζώτου και 20% ηλίου συμπυκνωθεί έχει σημείο δρόσου 111.2 K και η σύσταση του πρώτου δρόσου είναι ουσιαστικά άζωτο (ποσοστό αζώτου 99.35%). Με μείωση θερμοκρασίας στους 80 K το άζωτο είναι 99.43 %. Το μείγμα συμπυκνώνεται ως υγρό άζωτο σε ποσοστό 79 mole%. Επομένως, η διαλυτότητα του ηλίου στο υγρό άζωτο είναι αμελητέα, με μικρή αύξησή της όταν μειώνεται η θερμοκρασία, ή όταν αυξάνεται η πίεση σε σταθερή θερμοκρασία.

### ΥΔΡΟΓΟΝΟ-ΗΛΙΟ

Η σύσταση του υδρογόνου σε θερμοκρασία δωματίου είναι 75% όρθο και 25% πάρα υδρογόνο. Για την υγροποίησή του, το υδρογόνο μετατρέπεται σε υδρογόνο ισορροπίας στους 20.4 K, με σύσταση 0.21% όρθο και 99.79% πάρα υδρογόνο. Τα δεδομένα ισορροπίας των υδρογόνου-ηλίου παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα σε θερμοκρασιακό εύρος 20.4-31.5 K. Η διαλυτότητα του ηλίου στο υδρογόνο είναι ουσιαστική, αυξανόμενη με αύξηση της πίεσης ανεξαρτήτου θερμοκρασίας. Στις υψηλές πιέσεις αυξάνεται με τη θερμοκρασία, ενώ στις χαμηλές μειώνεται με τη θερμοκρασία. Ο συντελεστής κατανομής K<sub>i</sub> μειώνεται με την πίεση σε σταθερή θερμοκρασία και μειώνεται με τη θερμοκρασία σε σταθερή πίεση.

# 2.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

### 2.2.1 Η ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ VIRIAL

Χρησιμοποιείται κυρίως για τον υπολογισμό ιδιοτήτων των αερίων. Με z τον παράγοντα συμπιεστότητας, ν μοριακό όγκο και ρ μοριακή πυκνότητα προκύπτει:

$$z = \frac{Pv}{RT} = 1 + \frac{B}{v} + \frac{C}{v^2} + \frac{D}{v^2}$$
(2.2)

ή στη μορφή:

$$z = 1 + B\rho + C\rho^2 + D\rho^3$$
 (2.3)

Με B,C,D συντελεστές που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. Σε πιέσεις μικρότερες των 100 atm οι συντελεστές C και D μπορούν να παραλειφθούν, και η εξίσωση να πάρει την παρακάτω μορφή:

$$v = \frac{RT}{P} + B \qquad (2.4)$$

Στην περίπτωση των μειγμάτων, ο συντελεστής Β προκύπτει από τον κανόνα τετραγωνικής ανάμειξης:

$$B = \sum_{i} \sum_{j} y_i y_j B_{ij} \qquad (2.5)$$

Με y<sub>i</sub> η αναλογία mole του συστατικού i στο αέριο μείγμα. [4]

#### 2.2.2 ΤΟ ΘΕΩΡΗΜΑ ΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

Σύμφωνα με το θεώρημα των διπαραμετρικών αντίστοιχων καταστάσεων για απλό ρευστό, η μειωμένη πίεση κορεσμού ( $P^s/P_c$ ) όλων των υγρών είναι μια γενική εξίσωση της μειωμένης θερμοκρασίας τους ( $T/T_c$ ). Η ορθότητα του θεωρήματος αυτού αμφισβητήθηκε από τον Pitzer, ο οποίος εισήγαγε τον άκεντρο παράγοντα ω, ο οποίος προκύπτει από τη σχέση:

$$\omega = \left[ -\log_{10}(\frac{P^s}{P_c})_{\frac{T}{T_c}=0.7} \right] - 1.000 \quad (2.6)$$

Για απλά ρευστά, ω=0, για πιο πολύπλοκα παίρνει μεγάλες τιμές, για κβαντικά αέρια(He,H<sub>2</sub>,Ne) παίρνει αρνητικές τιμές.

Το ω είναι ουσιαστικά ένα μέτρο της ακεντρότητας, δείχνει τη μη σφαιρική φύση της πιθανής διαμοριακής συνάρτησης της ενέργειας, ως ένα θεώρημα αντιστοίχων καταστάσεων τριών παραμέτρων (P<sub>r</sub>,T<sub>r</sub>,ω) με P<sub>r</sub>=P/P<sub>c</sub> και T<sub>r</sub>=T/T<sub>c</sub>. Πλέον ο παράγοντας συμπιεστότητας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$z(P_r, T_r, \omega) = z^{(0)}(P_r, T_r, \omega = 0) + \omega z^{(1)}(P_r, T_r)$$
 (2.7)

Με  $z^{(o)}$  ο παράγοντας για απλά ρευστά, όπου ω=0 και  $z^{(1)}$  δείχνει την απόκλιση του z ενός πραγματικού ρευστού από το  $z^{(o)}$ . Οι τιμές των z έχουν πινακοποιηθεί σε όρους P<sub>r</sub>,T<sub>r</sub>.

Στην περίπτωση των κβαντικών αερίων, η εφαρμογή του θεωρήματος είναι δυνατή μόνο αν οι μειωμένες παράμετροι συνδεθούν με αποτελεσματικές κρίσιμες σταθερές. Οι τιμές των T<sub>c</sub>,P<sub>c</sub>,v<sub>c</sub> για κβαντικά αέρια προκύπτουν μέσω των σταθερών T<sub>c</sub><sup>0</sup>,P<sub>c</sub><sup>0</sup>,v<sub>c</sub><sup>0</sup>, ενώ απαλείφεται ο δεύτερος όρος της παραπάνω εξίσωσης καθώς ο παράγοντας ω είναι 0 στα κβαντικά αέρια. Οι σχέσεις που δίνουν τις σταθερές είναι οι εξής:
$$T_c = T_c^0 \left( \frac{1.0}{\left( 1.0 + \left( \frac{21.8}{MT} \right) \right)} \right)$$
 (2.8)

$$P_{c} = P_{c}^{0} \left( \frac{1.0}{1.0} + \frac{44.2}{MT} \right) \quad (2.9)$$
$$v_{c} = v_{c}^{0} \left( \frac{1.0}{\frac{1.0}{1.0 - \left(\frac{9.91}{MT}\right)}} \right) \quad (2.10)$$

Με Τ σε Κ και Μ το μοριακό βάρος. Οι κλασσικές κρίσιμες σταθερές για κβαντικά αέρια είναι πινακοποιημένες ώστε να υπολογιστούν οι σταθερές που είναι εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία. Στα μη κβαντικά αέρια οι σταθερές T<sub>c</sub><sup>0</sup>,P<sub>c</sub><sup>0</sup>,v<sub>c</sub><sup>0</sup> είναι αντίστοιχα οι κρίσιμες τιμές της θερμοκρασίας, πίεσης και όγκου αντίστοιχα, που προκύπτουν από ήδη γνωστές τιμές ή από πειραματικά δεδομένα. Σε περίπτωση μη ύπαρξης δεδομένων για v<sub>c</sub><sup>0</sup>, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω σχέση:

$$v_c^0 = \frac{RT_c^0}{P_c^0} (0.291 - 0.08\omega) \quad (2.11)$$

Μέσω των σχέσεων αυτών και με δοσμένες τιμές σε θερμοκρασία και πίεση πάνω από την κρίσιμη τιμή μπορεί να υπολογιστεί η πυκνότητα του αερίου, για πίεση μικρότερη των 100 atm και για πυκνότητα μικρότερη της κρίσιμης.

Στην περίπτωση των μειγμάτων, τα οποία μπορεί να αποτελούνται από περισσότερα από ένα κβαντικά αέρια, ο υπολογισμός των αντίστοιχων δυαδικών ψευδό-κρίσιμων σταθερών γίνεται μέσω των σχέσεων:

$$T_{c_{ij}} = \frac{\sqrt{T_{c_i}^0 T_{c_j}^0 (1 - k_{ij})}}{1 + (\frac{21.8}{M_{ij}T})}$$
(2.12)  
$$P_{c_{ij}} = \frac{P_{c_{ij}}^0}{1 + (\frac{44.2}{M_{ij}T})}$$
(2.13)

με

$$P_{c_{ij}}^{0} = \frac{z_{c_{ij}}^{0} R_{\sqrt{\left(T_{c_{i}}^{0} T_{c_{j}}^{0}\right)} \left(1 - k_{ij}\right)}}{v_{c_{ij}}^{0}} \quad (2.14)$$

Ο όρος  $k_{ij}$  είναι σταθερά αλληλεπίδρασης και υπολογίζεται μέσω παλινδρόμησης από πειραματικά δεδομένα.

$$\sqrt[3]{v_{c_{ij}}^{0}} = \frac{1}{2} \left[ \sqrt[3]{v_{c_{i}}^{0}} + \sqrt[3]{v_{c_{j}}^{0}} \right] \quad (2.15)$$

$$z_{c_{ij}}^{0} = 0.291 - 0.08 \left[ \frac{\omega_{i} + \omega_{j}}{2} \right] \quad (2.16)$$

$$\frac{1}{M_{ij}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{M_{i}} + \frac{1}{M_{j}} \right] \quad (2.17)$$

#### 2.2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ VIRIAL

Οι συντελεστές virial δείχνουν τη μη ιδανικότητα ενός αερίου λόγω των δυαδικών, τριαδικών και τετραδικών αλληλεπιδράσεων, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων σε αέρια κατάσταση. Ο Κωνσταντίνος Τσονόπουλος δημιούργησε την παρακάτω σχέση υπολογισμού των δεύτερων συντελεστών virial:

$$\frac{BP_c}{RT_c} = \frac{(0.1445 + 0.0637\omega) - (0.33)T_r - (0.1385 - 0.331\omega)}{T_r^2} - \frac{(0.0121 + 0.423\omega)}{T_r^3} - \frac{(0.000607 + 0.008\omega)}{T_r^8} \quad (2.18)$$

Για τον υπολογισμό του B<sub>12</sub> μέσω της εξίσωσης αυτής, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των ψευδό-κρίσιμων σταθερών για κλασσικά ρευστά, T<sub>cij</sub>, P<sub>cij</sub>, ω<sub>cij</sub>:

$$T_{c_{ij}} = \sqrt{T_{c_i} T_{c_j}} (1 - k_{ij}) \quad (2.19)$$

$$P_{c_{ij}} = \frac{z_{c_{ij}} R \sqrt{T_{c_i} T_{c_j}} (1 - k_{ij})}{v_{c_{ij}}} \quad (2.20)$$

$$v_{c_{ij}} = \frac{1}{8} \left( \sqrt[3]{v_{c_i}} + \sqrt[3]{v_{c_j}} \right) \quad (2.21)$$

Με ω<sub>ij</sub> η μέση τιμή των ω<sub>i</sub>, ω<sub>j</sub>.

Άλλη σχέση συσχέτισης δεύτερων συντελεστών είναι αυτή του Goodwin, μεταξύ των του υδρογόνου και ενός θερμοκρασιακού εύρους 15-423 Κ:

$$B = \sum_{i=1}^{4} b_{iq}^{(z_i - 1)/4} \quad (2.22)$$

Όπου:

$$q = \frac{109.83}{T(K)}$$
$$b_1 = 42.464$$
$$b_2 = -37.1172$$
$$b_3 = -2.2982$$
$$b_4 = -3.0484$$

Kαι b σε cm³/mol

Η σχέση για τον τρίτο συντελεστή C (σε (cm³/mol)²), για θερμοκρασιακό εύρος 24-423 K είναι:

$$C = 1310.5q^{1/2}[1 + 2.1486q^3][1 - \exp(1 - q^{-3})] \quad (2.23)$$

Στην περίπτωση του ηλίου και για θερμοκρασιακό εύρος 300-1000 K, οι σχέσεις του Harrison δίνουν τους συντελεστές:

$$B = 1.3436 \times 10^{-2} (15.8922 - \ln T)^3 - 4.39 \exp(-2.4177 \times 10^{-3}T) \quad (2.24)$$
$$C = 9.0263 \times 10^{-5} (15.8922 - \ln T)^6 \quad (2.25)$$

#### 2.2.4 ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ PENG-ROBINSON

Η εξίσωση, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί τόσο για υγρή όσο και για αέρια φάση, είναι:

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a(T)}{v(v+b) + b(v-b)}$$
(2.26)

Η σταθερά b για καθαρό συστατικό είναι ίση με:

$$b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c} \qquad (2.27)$$

με T<sub>c</sub> και P<sub>c</sub> κρίσιμη θερμοκρασία και πίεση αντίστοιχα.

α(Τ) είναι συνάρτηση θερμοκρασίας και δίνεται από:

$$\alpha(T) = \alpha(T_c)\alpha(T) \quad (2.28)$$

$$a(T_c) = 0.45724 \frac{(RT_c)^2}{P_c} \quad (2.29)$$
$$a(T) = [1 + \beta \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}}\right)]^2 \quad (2.30)$$
$$\beta = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2 \quad (2.31)$$

Με  $0 \le \omega < 0.5$ ο άκεντρος παράγοντας.

Για μείγματα, ο υπολογισμός των α, b προκύπτει μέσω του κανόνα τετραγωνικής ανάμειξης του van der Waal:

$$\alpha = \sum_{i} \sum_{j} z_{i} z_{j} a_{ij} \quad (2.32)$$
$$b = \sum_{i} \sum_{j} z_{i} z_{j} b_{ij} \quad (2.33)$$

με

$$a_{ij} = (a_{ii}a_{jj})^{\frac{1}{2}}(1 - k_{ij}) \quad (2.34)$$
$$b_{ij} = \frac{1}{2}(b_{ii} + b_{jj})(1 - c_{ij}) \quad (2.35)$$

Με  $z_i$  η αναλογία Mole του συστατικού i του μείγματος, ενώ  $k_{ij}$  και  $c_{ij}$  οι σταθερές αλληλεπίδρασης. [6]

### 2.2.5 ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΥΓΡΟΥ-ΑΤΜΟΥ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Η κατάσταση ισορροπίας μπορεί να προσδιοριστεί με επίλυση των παρακάτω εξισώσεων:

$$\bar{f}_i^V = \bar{f}_i^L \quad (2.36)$$
$$py_i \bar{\varphi}_i^V = P x_i \bar{\varphi}_i^L \quad (2.37)$$

Όπου ισχύει:

$$1 < i < c$$
$$\sum x_i = 1$$
$$\sum y_i = 1$$

με *x<sub>i</sub>*, *y<sub>i</sub>* οι αναλογίες mole συστατικού i υγρής και ατμώδης φάσης αντίστοιχα σε ισορροπία, ενώ c είναι ο αριθμός των συστατικών του μείγματος.

Για τις συστάσεις στη φάση της ισορροπίας, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των συντελεστών πτητικότητας:

$$\ln \bar{\varphi}_{k}^{V} = \frac{b_{k}}{b} \left[ \frac{Pv}{RT} - 1 \right] \\ -\ln \left[ \frac{P(v-b)}{RT} \right] - \ln \left[ \frac{P(v-b)}{RT} \right] - \frac{a}{2\sqrt{2}bRT} \left[ \frac{2\sum z_{i}a_{ik}}{a} - \frac{b_{k}}{b} \right] \\ \times \ln \frac{V + (1+\sqrt{2}b)}{V - (1-\sqrt{2}b)} \quad (2.38)$$

Με  $z_i$  η αναλογία mole του συστατικού i του μείγματος στη συγκεκριμένη κατάσταση και ν ο μοριακός όγκος στην ίδια κατάσταση. Στην παραπάνω εξίσωση οι άγνωστοι όροι δίδονται από τον τετραγωνικό κανόνα ανάμειξης και των σταθερών  $k_{ij}$  και  $c_{ij}$ , οι οποίες προκύπτουν από ανάλυση των πειραματικών δεδομένων.

#### 2.2.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΛΥΤΟΤΗΤΑΣ ΚΡΥΟΓΟΝΙΚΩΝ ΑΕΡΙΩΝ

Καλή προσέγγιση στην πραγματική τιμή της διαλυτότητας αερίων αποτελεί η σχέση Prausnitz-Shair:

$$\frac{1}{x_2} = \frac{f_2^L}{f_2^g} = \exp\left[\frac{\nu_2^L(\delta_1 - \delta_2)^2 \varphi_1^2}{RT}\right] \quad (2.39)$$

Όπου  $x_2$  παράμετρος διαλυτότητας,  $v_2$  μοριακός όγκος,  $\phi_1$  η αναλογία όγκου του συστατικού του διαλύτη και  $f_2^L$ ,  $f_2^g$  καθαρή υγρή και αέρια πτητικότητα αντίστοιχα. Με δείκτη 1 εννοείται το υγρό διαλυτικό μέσο και με δείκτη 2 η αέρια διαλυμένη ουσία. Η εξίσωση χρησιμοποιείται για θερμοκρασία αέριας διαλυμένης ουσίας 298 Κ. Στην περίπτωση υπολογισμού διαλυτότητας σε μείγμα με περισσότερους από έναν διαλύτες, τότε χρησιμοποιείται η ίδια εξίσωση με την αντικατάσταση:

$$\delta_2 = \bar{\delta} = \sum_i \varphi_i \delta_i \quad (2.40)$$

με  $\overline{\delta}$  ο αριθμητικός μέσος όλων των συστατικών.

Για τη διαλυτότητα κβαντικών αερίων, χρησιμοποιείται η σχέση των Krichevsky-Illinskaya με αντικατάσταση από το νόμο του Henry ( με σταθερά Henry H<sub>2,1</sub>).

Nóμος Henry:

$$Py_i\bar{\varphi}_i^g = H_{i,\delta\iota\alpha\lambda\nu\mu\dot{\epsilon}\nu\eta\ o\nu\sigma\dot{\iota}\alpha\ Xi}(\gamma\iota\alpha\ x_i \to 0) \quad (2.41)$$

Ο συντελεστής πτητικότητας  $\bar{\varphi}_i^g$  μπορεί να υπολογιστεί με εξίσωση κατάστασης ως εξής:

$$RT \ln \bar{\varphi}_{i}^{g} = [2 \sum y_{i}B_{ij} - B]P \quad (2.42)$$
$$B = \sum_{i}^{c} \sum_{j}^{c} y_{i} y_{j}B_{ij} \quad (2.43)$$

Στην περίπτωση πολύ αραιού μείγματος ( $y_i \rightarrow 0$ ):

$$\ln \varphi_i^{\infty} = \frac{2B_{ij}}{v_{j(\kappa\alpha\theta\alpha\rho\delta)}} - \ln z_{j(\kappa\alpha\theta\alpha\rho\delta)} \quad (2.44)$$

Με αντικατάσταση προκύπτει η σχέση των Krichevsky-Illinskaya:

$$\ln\frac{\bar{f}_2}{x_2} = \ln H_{2,1}\left(P_1^s\right) + \frac{A}{RT}\left(x_1^2 - 1\right) + \frac{\bar{v}_2^\infty(P - P_1^s)}{RT} \quad (2.45)$$

Με

$$\ln \gamma_2^* = \frac{A}{RT} (x_1^2 - 1) \quad (2.46)$$
$$\bar{f}_2 = \gamma_2^* H_{2,1} (P_1^s) x_2 \quad (2.47)$$

Με  $\bar{f_2}$  μερική πτητικότητα της αέριας διαλυμένης ουσίας στην αέρια κατάσταση και  $\bar{v}_2^\infty$  ο μερικός μοριακός όγκος.

Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιείται κυρίως για ελαφριά αέρια σε υγρούς διαλύτες, όπως το LNG ή το υγρό άζωτο.

Χωρίς τη σταθερά του νόμου του Henry, ο υπολογισμός της  $H_{2,1}$  είναι δυνατός με τη χρησιμοποίηση εξίσωσης κατάστασης:

$$H_{2,1}^{(P_1^s)} = \bar{\varphi}_2^{L,\infty} P_1^s \quad (2.48)$$

Με  $\bar{\varphi}_2^{L,\infty}$ ο συντελεστής πτητικότητας της αέριας διαλυμένης ουσίας 2 στην υγρή φάση σε άπειρη διάλυση.

Η λογαριθμική σταθερά του νόμου του Henry για μείγμα βρίσκεται από εξίσωση της σύστασης του διαλύτη όταν δυο διαλύτες δημιουργούν ιδανικό μείγμα. Για μη ιδανικό, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\ln H_{2,\mu\epsilon i\gamma\mu\alpha\tau\sigma\varsigma} = x_1 \ln H_{2,1} + x_3 \ln H_{2,3} - a_{13}x_1x_3 \qquad (2.49)$$

Με α13 η δικατάληκτη σταθερά του Margule για διαλύτη 1 και 3 (στο ιδανικό μείγμα είναι 0)

Για α<sub>13</sub>>0 τότε η σταθερά του Henry είναι μικρότερη και η διαλυτότητα είναι μεγαλύτερη.

Για α<sub>13</sub><0 η διαλυτότητα του αερίου είναι μικρότερη σε σχέση με την περίπτωση ιδανικού μείγματος.

Η σχέση που δίνει την πτητικότητα του υγρού είναι η εξής:

$$f_2^L = f_2^{0.1} \exp\left[\frac{v_2^L(P-1)}{RT}\right]$$
 (2.50)

η οποία προκύπτει από παρεμβολή καμπύλης πειραματικών δεδομένων. Η πίεση Ρ είναι σε atm.

Η αναλογία όγκου  $φ_1$  προκύπτει από τη σχέση:

$$\varphi_1 = \frac{v_1^L x_1}{v_1^L x_1 + v_2^L x_2} \qquad (2.51)$$

Η παράμετρος x<sub>2</sub> υπολογίζεται με επαναλήψεις, αρχικά υποθέτοντας φ<sub>1</sub>=1 και διορθώνοντας την τιμή επαναληπτικά. Εφόσον η μερική πίεση του αερίου δεν είναι πολύ μεγάλη και η τιμή x<sub>2</sub> είναι σχετικά μικρή, η τιμή φ<sub>1</sub>=1 δίνει μια ικανοποιητική προσέγγιση.

### 2.2.7 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Στην περίπτωση κρυογονικών ρευστών υπάρχει δυσκολία στην εξεύρεση αξιόπιστων πειραματικών αποτελεσμάτων καθώς υπάρχει αβεβαιότητα στην περίπτωση παροδικών μετρήσεων σε τόσο χαμηλές θερμοκρασίες. Παρατηρείται όμως πως η θερμική αγωγιμότητα και το ιξώδες των ρευστών αυτών συμπεριφέρεται με παρόμοιο τρόπο με την πίεση και θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, οι δυο ιδιότητες αυξάνονται με μείωση της θερμοκρασίας και αύξηση της πίεσης στην περιοχή υψηλών πιέσεων για συμπιεσμένα ρευστά, ενώ αυξάνονται με αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης για αέρια στην περιοχή χαμηλών πιέσεων. Η σχέση του Keesom υπολογίζει το ιξώδες σε micropoise για ήλιο στην περιοχή 4-1100 Κ:

 $\mu = 5.023T^{0.647} \qquad (2.52)$ 

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΡΥΟΓΟΝΙΚΑ ΠΡΟΩΘΗΤΙΚΑ ΓΙΑ ΠΥΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΩΣΗ

## 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα προωθητικά είναι χημικά τα οποία χρησιμοποιούνται ώστε να δώσουν την απαραίτητη ώθηση για προώθηση πυραυλικών μηχανών. Μέσω θαλάμου καύσης δημιουργούν αέρια σε υψηλή θερμοκρασία, των οποίων η ροή επιταχύνεται και τα αέρια εκτοξεύονται μέσω ακροφυσίου, προσδίδοντας την απαραίτητη δυναμική για τη μηχανή του διαστημοπλοίου. Η δύναμη που δημιουργεί η εκτόξευση του αερίου ωθεί τη μηχανή, ενώ η δύναμη αντίδρασης που προκύπτει διατηρεί την κίνηση της μηχανής. Συνήθως τα προωθητικά αποτελούνται από ένα οξειδωτικό, το οποίο παράγει το απαραίτητο για την αντίδραση οξυγόνο, και το καύσιμο. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει μετατροπή της θερμικής ενέργειας των χημικών σε κινητική.

Τα προωθητικά κατηγοριοποιούνται σε στερεά, υγρά και υβριδικά. Στην περίπτωση των στερεών, υπάρχει ανάμειξη του οξειδωτικού μέσου και του καυσίμου με άλλες χημικές ενώσεις όπως καταλύτης, σύνδεσμοι και εποξικά και στη συνέχεια χύνονται σε κατάλληλο χώρο της μηχανής του πυραύλου. Εδώ το καύσιμο όταν αναφλεγεί καίγεται εξ' ολοκλήρου με αδιάκοπη λειτουργία της μηχανής. Τα στερεά προωθητικά είναι σταθερά και εύκολα ως προς την αποθήκευση.

Τα υγρά προωθητικά είναι καύσιμα πρόωσης σε υγρή μορφή. Χρειάζονται διαφορετικά ντεπόζιτα για τον οξειδωτή και το καύσιμο. Για την ανάφλεξη τα προωθητικά ψεκάζονται μέσω αντλιών και εκτοξευτών στο θάλαμο καύσης, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα ελέγχου ή και διακοπής της καύσης, ανάλογα με το ρυθμό ψεκασμού, σε αντίθεση με τα στέρεα προωθητικά. Για τη δημιουργία φλόγας χρησιμοποιούνται αναφλεκτήρες, μπουζί ή εκρηκτικά. Τα υγρά προωθητικά χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες:

- 1. Προωθητικά διυλισμένου πετρελαίου
- 2. Κρυογονικά προωθητικά
- 3. Υπεργκολικά προωθητικά

Τα κρυογονικά προωθητικά είναι ουσιαστικά υγροποιημένα αέρια τα οποία αποθηκεύονται και διατηρούνται σε κρυογονικές θερμοκρασίες. Ο πιο διαδεδομένος συνδυασμός είναι υγρό υδρογόνο σαν καύσιμο και υγρό οξυγόνο σαν οξειδωτικό μέσο. Μια δυσκολία που προκύπτει στα κρυογονικά προωθητικά είναι η πολύ μικρή πυκνότητα του υγρού υδρογόνου, απαιτώντας ντεπόζιτο πολύ μεγαλύτερο σε όγκο σε σχέση με άλλα καύσιμα. Επίσης αποφεύγεται η χρήση τους σε πολεμικές εφαρμογές, καθώς η δυσκολία αποθήκευσής τους για μεγάλο χρονικό διάστημα έρχεται σε αντίθεση με την ανάγκη για άμεση διαθεσιμότητα και ετοιμότητα εκτόξευσης για επίσης μεγάλες χρονικές περιόδους. Σε εφαρμογές που η ετοιμότητα και η δυσκολία αποθήκευσης δεν αποτελούν πρόβλημα, τα κρυογονικά προωθητικά χρησιμοποιούνται, καθώς έχουν μεγάλη αποδοτικότητα. Τα υπεργκολικά προωθητικά αναφλέγονται όταν έρχεται σε επαφή το καύσιμο με το οξειδωτικό μέσο, δηλαδή δε χρειάζονται μηχανισμούς ανάφλεξης. Τη δυνατότητά τους αυτή εκμεταλλεύονται συστήματα κίνησης διαστημοπλοίων και για εισαγωγή τους σε τροχιά, καθώς ο πλήρης έλεγχος της καύσης δίνει την ακρίβεια που είναι απαραίτητη σε τέτοιου είδους εφαρμογές. Το καύσιμο συνήθως αποτελείται από υδραζίνη, μονομεθυλοϋδραζίνη ή μη συμμετρική διμεθυλοϋδραζίνη. Το οξειδωτικό μέσο από τετροξείδιο αζώτου ή νιτρικό οξύ. Τα υπεργκολικά προωθητικά αποθηκεύονται σε υγρή κατάσταση και σε κανονικές θερμοκρασίες. Παρέχουν λιγότερη ενέργεια ανά μάζα σε σχέση με τα κρυογονικά. Επίσης, είναι πολύ επικίνδυνα καθώς είναι διαβρωτικά και η αποθήκευσή τους απαιτεί ειδικές δεξαμενές. Τέλος είναι αναγκαίο κατά τη διάρκεια της αποθήκευσής τους το καύσιμο να μην έλθει σε επαφή με το οξειδωτικό μέσο, ώστε να μη γίνει αντίδραση χωρίς έλεγχό τους.

Τα υβριδικά προωθητικά αποτελούνται από ένα μείγμα στερεών και υγρών προωθητικών. Συνήθως το καύσιμο είναι στη στέρεα μορφή και το οξειδωτικό μέσο στην υγρή. Για την ανάφλεξη, το υγρό ψεκάζεται στη δεξαμενή (η οποία λειτουργεί και σαν θάλαμος καύσης) που είναι αποθηκευμένο το στερεό. Το κόστος σε σχέση με λειτουργία μέσω στερεών προωθητικών είναι πολύ μικρότερο.

### 3.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ

Τα προβλήματα που θέτουν τα κρυογονικά προωθητικά δημιουργούν την ανάγκη επίλυσής τους σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό είναι δυνατό, καθώς προτιμώνται για τη χρήση πυραύλων. Ένα βασικό πρόβλημα είναι οι απώλειες boil-off. Λόγω εισροής θερμότητας, τα υγρά προωθητικά κατά τη διάρκεια της αποθήκευσής τους εξατμίζονται. Σε περίπτωση που οι ατμοί περιέχονται σε δεξαμενή, βαλβίδες ανακούφισης ανοίγουν ώστε να αποφευχθεί υπερπίεση με άνοδο θερμοκρασίας. Έτσι μέρος των προωθητικών διαφεύγει από τη δεξαμενή με τη μορφή ατμού. Αυτές οι απώλειες ονομάζονται boil-off. Περιορίζονται με κατάλληλη τοποθέτηση της δεξαμενής ώστε να έχουν όσο το δυνατό λιγότερη έκθεση στον ήλιο ή με χρήση σκίαστρου.

Άλλο πρόβλημα είναι η δυνατότητα του υγρού οξυγόνου να δημιουργεί εκρηκτικές ενώσεις με άλλα οργανικά υλικά. Επίσης το υδρογόνο αντιδρά με υλικά κάνοντάς τα εύθραυστα, αλλάζοντας τη δομή των κόκκων τους. Ακόμα, σε κρυογονικές θερμοκρασίες, οι θερμικές πιέσεις μπορούν να επηρεάσουν την υπάρχουσα κατασκευή. Επιπλέον, σε αυτές τις συνθήκες, μπορεί οι σφήνες που κλείνουν ερμητικά τις δεξαμενές που περιέχουν τα προωθητικά να "λασκάρουν", και να υπάρξει διαρροή υδρογόνου. Είναι απαραίτητο αυτή η απώλεια του υδρογόνου να έχει λογικά επίπεδα και όχι επικίνδυνα για πυρκαγιά (συγκέντρωση υδρογόνου μεταξύ 4-96% προκαλεί ανάφλεξή του). Τέλος, σε εφαρμογές στο διάστημα, σε περιβάλλον που δεν υπάρχει βαρύτητα, μπορεί να μετατραπεί το υγρό προωθητικό σε αέριο και να διαφύγει από το ακροφύσιο που αποβάλλει εκτός του διαστημοπλοίου τα καυσαέρια. Δηλαδή, να υπάρξει μεγάλη διαρροή καυσίμου στο διάστημα.

Η έλλειψη βαρύτητας και οι διαστημικές εφαρμογές αποτελούν μια μεγάλη πρόκληση για τη διαχείριση των κρυογονικών ρευστών, καθώς επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας, την αποθήκευσή τους, θέτουν εμπόδια στη διατήρηση των κατάλληλων συνθηκών.

#### 3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ

Τα βασικά μεγέθη ανάλυσης είναι η θερμοκρασία και η πίεση. Κατά την ανάφλεξη, αυξάνεται η πίεση και η θερμοκρασία των αερίων μεγεθών. Σκοπός είναι τα αέρια αυτά να αποκτήσουν υψηλή ταχύτητα με μείωση της θερμοκρασίας και της πίεσής τους, κάτι που επιτυγχάνεται μέσω συγκλίνων-αποκλίνων ακροφύσιο.

Στην περιοχή μετά το λαιμό, στο αποκλίνων τμήμα η πίεση των αερίων μειώνεται και υπάρχει επιτάχυνση της ροής.

Δεν υπάρχει συναλλαγή θερμότητας ή έργου, οπότε ισχύει:

$$h_{T_2} = h_{T_1} \qquad (3.1)$$

ή

$$h_{T_c} = h_{T_e} \qquad (3.2)$$

Και παίρνει τη μορφή:

$$C_p T_c + \frac{u_c^2}{2} = C_p T_e + \frac{u_e^2}{2}$$
 (3.3)

Με παραδοχή ιδανικού αερίου, συνδέονται οι θερμοκρασίες καύσης  $T_c$ και εξόδου $T_e$ :

$$\frac{T_e}{T_c} = (\frac{P_e}{P_c})^{(k-1)/k} \quad (3.4)$$

Η ιδανική ταχύτητα εξάτμισης δίνεται από τον τύπο:

$$V_e = \sqrt{(\frac{2k}{k-1})(\frac{R'T_c}{M})(1-(\frac{P_e}{P_c})^{(k-1)/k}} \quad (3.5)$$

Με k ειδική αναλογία θερμότητας, R' παγκόσμια σταθερά αερίων,  $T_c$  θερμοκρασία καύσης, Μ μέσο μοριακό βάρος των αερίων εξάτμισης,  $P_c$  πίεση θαλάμου καύσης,  $P_e$  η πίεση εξόδου του ακροφυσίου.

Η μεγαλύτερη θερμοκρασία φλόγας επιτυγχάνεται όταν υπάρχει εκείνη η ποσότητα οξυγόνου κατά την οποία μπορεί να αντιδράσει με όλο το καύσιμο. Πολλές φορές είναι επιθυμητή η παρουσία περίσσειας καυσίμου. Στο ακροφύσιο στην περιοχή του λαιμού του το αέριο αποκτά ηχητική ταχύτητα, ενώ στο αποκλίνον τμήμα του με μείωση της θερμοκρασίας και της πίεσης υπάρχει επιτάχυνση, με την ταχύτητα να αποκτά υπερηχητικές τιμές. Ορίζεται ως αριθμός Mach N<sub>m</sub> ο λόγος της ταχύτητας του αερίου προς την ταχύτητα του ήχου, και η τιμή του στην έξοδο του ακροφυσίου για ιδανικό αέριο δίνεται από τη σχέση:

$$N_m^2 = \left(\frac{2}{k-1}\right) \left[ \left(\frac{P_c}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (3.6)$$

Με  $P_a$  την πίεση περιβάλλοντος.

Ο αριθμός Mach της εξόδου σχετίζεται με το αντίστοιχο εμβαδό διατομής  $A_e$  σύμφωνα με τη σχέση:

$$A_{e} = \left(\frac{A_{t}}{N_{m}}\right) \left[\frac{1 + \left(\frac{k-1}{2}\right)N_{m}^{2}}{\frac{(k+1)}{2}}\right]^{\left(\frac{k+1}{2(k-1)}\right)}$$
(3.7)

Με  $A_t$  το εμβαδόν διατομής του λαιμού.

Η ώση είναι η δύναμη αντίδρασης η οποία δίνει την απαραίτητη ώθηση στη μηχανή, και προκύπτει λόγω της εξαγωγής των προωθητικών σε πολύ μεγάλες ταχύτητες. Η κατανομή της πίεσης δεν είναι συμμετρική καθώς κοντά στο ακροφύσιο μειώνεται, ενώ δεν υπάρχει δύναμη ώστε να αντισταθεί στη δύναμη λόγω της πίεσης από τα καυσαέρια στην έξοδο. Επομένως η ώση είναι η δύναμη F που προκύπτει από τη διαφορά πίεσης του εσωτερικού με το περιβάλλον, είναι η ίση και αντίθετη δύναμη που ασκεί ο αέρας πάνω στον κινητήρα.

Προκειμένου να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ώση, είναι απαραίτητη η ύπαρξη πολύ μεγάλων πιέσεων και θερμοκρασιών. Η εξασφάλιση αυτών προϋποθέτει πολύ ενεργητικό καύσιμο όπως είναι το υδρογόνο, αλλά και πολύ μικρή μοριακή μάζα των καυσαερίων. Η μεγάλη μείωση της πίεσης αποτυπώνεται στη μεγάλη τιμή του λόγου των διατομών εξόδου και λαιμού,  $A_e/A_t$ . [3]



Σχήμα 3.1: Λειτουργία ακροφυσίου



Σχήμα 3.2: Σχηματική περιγραφή των δυνάμεων σε ένα πύραυλο

Η εξίσωση τους ώσης προκύπτει από την αρχή διατήρησης τους ορμής:

$$F = qV_e + (P_e - P_a)A_e \ (3.8)$$

Με q ο ρυθμός με τον οποίο εξέρχεται η ροή μάζας, με δείκτη α η τιμή περιβάλλοντος και με e εξόδου του ακροφυσίου. Ο όρος  $(P_e - P_a)A_e$  είναι η διαφορά πίεσης που οφείλεται στην έλλειψη ισορροπίας των δυνάμεων πίεσης στην έξοδο του ακροφυσίου τους αναφέρθηκε. Η ώση γίνεται βέλτιστη όταν η πίεση στην έξοδο του ακροφυσίου είναι ίση με αυτή που επικρατεί στο περιβάλλον, δηλαδή  $P_e = P_a$  και ο όρος τους ώσης παίρνει τη μορφή:

$$F = qV_e \quad (3.9)$$

Η μεταβολή (αύξηση) τους ταχύτητας δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta V = V_e \ln\left(\frac{m_o}{m_f}\right) \quad (3.10)$$

Με  $m_o$  αρχική και  $m_f$  τελική μάζα του πυραύλου.

Ισχύει:

$$m_f = (m_0 - qt)$$
 (3.11)

Όπου t ο χρόνος καύσης που χρειάζεται η μηχανή για την εξασφάλιση συγκεκριμένης μεταβολής τους ταχύτητας, και λαμβάνεται από τη σχέση:

$$t = \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta V}{V_e}\right)\right] \frac{m_0}{q} \quad (3.12)$$

#### 3.4 ΕΙΔΙΚΗ ΩΘΗΣΗ

Η ειδική ώθηση ορίζεται ως ο λόγος τους ώσης τους το βάρος του προωθητικού που καταναλώνεται το δευτερόλεπτο, και είναι ουσιαστικά ένα μέγεθος που δείχνει την απόδοση του προωθητικού:

$$I_{sp} = \frac{F}{qg} \qquad (3.13)$$

Όπου g η επιτάχυνση τους βαρύτητας.

Η ιδανική ειδική ώθηση δίδεται από τον τύπο:

$$I_{sp} = \frac{1}{g} \sqrt{2T_c (\frac{R'}{M})^{k/(k-1)}} \sqrt{1 - (\frac{P_e}{P_c})^{k/(k-1)}} \quad (3.14)$$

Εφόσον η πίεση εξόδου( περιβάλλοντος) περιλαμβάνεται στην εξίσωση, είναι σκόπιμο να αναφέρεται κάθε φορά που υπολογίζεται η ιδανική ειδική ώθηση αν είναι για κενό στο διάστημα ή αν βρίσκεται στο επίπεδο τους θάλασσας. Η τιμή τους διαφέρει τους δυο περιπτώσεις.

Κατά τη λειτουργία τους πυραυλικής μηχανής υπάρχουν ορισμένες απώλειες, οι οποίες οφείλονται κυρίως στη διαδικασία τους καύσης (είναι ατελής), στο ακροφύσιο και τους αντλίες. Η πραγματική τιμή τους ειδικής ώθησης είναι μικρότερη από την ιδανική, και λαμβάνεται ως η τιμή τους ιδανικής πολλαπλασιαζόμενη με διορθωτικούς παράγοντες. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται ειδική παραδιδόμενη ώθηση και δίδεται από τον τύπο:

$$\bar{I}_{sp} = \eta^* \zeta_p \zeta_d \lambda I_{sp} \quad (3.15)$$

Όπου οι διορθωτικοί παράγοντες αφορούν την αποτελεσματικότητα τους καύσης, την πίεση του θαλάμου, την εκφόρτιση και τη διάσταση του ακροφυσίου αντίστοιχα.

#### 3.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΤΟΞΕΥΣΗΣ

#### 3.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μάζα τους πυραυλικού οχήματος αποτελείται κυρίως από προωθητικό. Το μεγάλο βάρος τους σε συνδυασμό με τους περιορισμούς που θέτουν τα ίδια τα υλικά καθιστούν σχεδόν αδύνατη την ανύψωση του οχήματος σε τροχιά. Οι περιορισμοί αυτοί ξεπεράσθηκαν με κατασκευή του πυραύλου σε συνδεόμενες μεταξύ τους βαθμίδες, οι οποίες εφόσον τελειώσει το προωθητικό το οποίο περιέχουν, αποσπώνται από την κατασκευή. Μειώνεται με αυτόν τον τρόπο η μάζα του οχήματος, και έτσι απαιτείται μικρότερη ειδική ώθηση. Προκειμένου να υπερνικηθεί η βαρυτική δύναμη, είναι απαραίτητο η ώση να είναι αρκετά μεγαλύτερη από το βάρος. Ενδεικτική τιμή του λόγου είναι 50-75. Οι μηχανές που έχουν μεγάλη αναλογία επιταχύνουν περισσότερο. Τα ακροφύσια σχεδιάζονται ώστε να λειτουργούν σε συγκεκριμένα υψόμετρα. Οπότε σε ένα διαστημικό όχημα χρειάζονται δυο τύποι ακροφυσίων και μηχανών, ο πρώτος θα λειτουργεί από την εκτόξευση μέχρι το όριο τους ατμόσφαιρας και ο δεύτερος στο κενό του διαστήματος.

Σε μια πολυβάθμια πυραυλική κατασκευή, η μεταβολή τους ταχύτητας για κάθε βαθμίδα δίδεται από τον τύπο:

$$\Delta V_i = V_{ei} \ln \left(\frac{m_{oi}}{m_{fi}}\right) \quad (3.16)$$

Με  $m_{oi}$  η συνολική μάζα του οχήματος όταν η βαθμίδα i αναφλέγεται και  $m_{fi}$  η συνολική μάζα του οχήματος όταν η βαθμίδα i έχει καεί αλλά δεν έχει αποσπαστεί. Η συνολική μεταβολή τους ταχύτητας για η βαθμίδες είναι:

$$\Delta V_{total} = \sum_{i=1}^{n} \Delta V_i \quad (3.17)$$

Για την κατασκευή του οχήματος ισχύει ότι οι βαθμίδες δεν είναι τους μεταξύ τους και η απαραίτητη ταχύτητα για την ώση διαφέρει σε κάθε μία. Το πραγματικό ωφέλιμο φορτίο είναι τους τελευταίας βαθμίδας. Αρχικά υπολογίζεται η μάζα τους βαθμίδας τους και διαστασιολογείται το όχημα. Η κατασκευή αυτή δημιουργεί το ωφέλιμο φορτίο για την υπόλοιπη βαθμίδα η οποία διαστασιολογείται και αυτή και η διαδικασία ακολουθείται για τους υπόλοιπες. Για τη μεγιστοποίηση του ωφέλιμου φορτίου για δοσμένη απαιτούμενη μεταβολή ταχύτητας ισχύουν τα εξής:

- Οι βαθμίδες με υψηλότερη  $I_{sp}$  πρέπει να είναι πάνω από αυτές με χαμηλότερη.
- Οι βαθμίδες με υψηλότερη  $I_{sp}$  πρέπει να αυξάνουν περισσότερο την ταχύτητα.
- Η επόμενη βαθμίδα πρέπει να είναι μικρότερη σε μέγεθος από την προηγούμενη
- Τους βαθμίδες να δίνουν τους ταχύτητες

#### 3.5.2 ΚΡΥΟΓΟΝΙΚΑ ΠΡΟΩΘΗΤΙΚΑ

Βασικά χαρακτηριστικά των κρυογονικών προωθητικών είναι η μεγάλη έκλυση θερμότητας κατά τη διάρκεια τους καύσης, χαμηλό σημείο πήξης, υψηλή πυκνότητα πριν και χαμηλή μετά την καύση, χαμηλή πίεση κορεσμού, χημική σταθερότητα ενώ δεν είναι επικίνδυνα ως τους την τοξικότητα ούτε είναι διαβρωτικά. Τα κρυογονικά προωθητικά δίνουν πολύ περισσότερη ώθηση από συμβατικά χημικά προωθητικά. Συγκεκριμένα, υγρό υδρογόνο αποδίδει ειδική ώθηση μεγαλύτερη κατά 40% από άλλα καύσιμα. Τα βασικά κρυογονικά που είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά ως προωθητικά είναι το υγρό υδρογόνο και το υγρό άζωτο. Η ιδιαιτερότητά τους έγκειται στο γεγονός ότι η βέλτιστη αναλογία τους ως τους το μείγμα δε δίνει τη βέλτιστη ειδική ώθηση, τους συμβαίνει με τα υπόλοιπα προωθητικά. Η μέγιστη δυνατή ειδική ώθηση εμφανίζεται σε τιμή αναλογίας ίση με 3.5. Σε πολύ υψηλά επίπεδα, επειδή το υγρό υδρογόνο έχει πολύ χαμηλή πυκνότητα, ο όγκος του προωθητικού μειώνεται πολύ. Η μείωση τους ειδικής ώθησης συνοδεύεται τους από μείωση του όγκου αποθήκευσης, άρα μικρότερο όχημα, υπερκαλύπτοντας τη μείωση τους απόδοσης. Για μηχανές υγρού υδρογόνου και αζώτου η τυπική τιμή αναλογίας στο μείγμα κυμαίνεται μεταξύ 5 και 6.

#### 3.5.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Αρχικά αφού το καύσιμο πρώτα περάσει μετρητική βαλβίδα και στη συνέχεια πολλαπλά ακτινικά περάσματα εισέρχεται στην πλάκα έγχυσης. Παράλληλα, το οξειδωτικό μέσο εισέρχεται και αυτό στην κορυφή τους πλάκας έγχυσης, διαρρέοντας τα κάθετα περάσματα (διαχωρισμένα από τα ακτινικά) αφού πρώτα και αυτό περάσει βαλβίδα. Ύστερα εκτοξεύονται με μεγάλη πίεση από διαφορετικές τρύπες στο θάλαμο καύσης, όπου και καίγονται. Το αέριο που δημιουργείται επιταχύνεται μέσω ακροφυσίου. Αρχικά το αέριο βρίσκεται στην υποηχητική περιοχή (συγκλίνον τμήμα) και έπειτα περνά στην υπερηχητική περιοχή (αποκλίνον τμήμα). Στο λαιμό του ακροφυσίου επιτυγχάνεται ηχητική ταχύτητα αερίου. Το σύστημα του θαλάμου καύσης και του ακροφυσίου ονομάζεται θάλαμος ώσης. Σε τους περιπτώσεις, υπάρχει ψύξη των τοίχων του θαλάμου ώσης, μέσω σωλήνων οι οποίοι διαρρέονται από το καύσιμο ή το οξειδωτικό μέσω πριν την εκτόξευση-ανάφλεξη.

Προκειμένου να είναι ελεγχόμενη πλήρως η καύση και όσο το δυνατόν λιγότερο ατελής, χρησιμοποιείται αναφλεκτήρας (μπουζί), ακόμα και όταν αυταναφλέγονται όταν αναμειγνύονται το καύσιμο με το οξειδωτικό μέσο. Τους χρειάζεται ψύξη στην είσοδο των αντλιών καθώς δημιουργούνται πολύ μεγάλες θερμοκρασίες. Η ψύξη γίνεται με ροή των κρυογονικών προωθητικών στο περίβλημα των αντλιών. Τέλος, υπάρχει για κάθε ρευστό κατάλληλος επαγωγέας στην είσοδο των αντλιών.

#### 3.5.4 BOIL-OFF

Όταν τα κρυογονικά προωθητικά αποκτήσουν θερμοκρασία μεγαλύτερη από το σημείο βρασμού τους, εξατμίζονται. Στην περίπτωση που βρίσκονται σε δεξαμενή, μέσω των ατμών αυξάνεται η πίεση και προκειμένου να αποφευχθεί υπερπίεση ή έκρηξη, κατάλληλη βαλβίδα ανακούφισης ρυθμίζει την πίεση, αφήνοντας μέρος του ατμού να διαφύγει. Υπάρχει δηλαδή διαρροή προωθητικού. Το ποσοστό του προωθητικού που διαφεύγει με τη μορφή ατμού αυξάνεται όσο μικρότερη είναι η δεξαμενή. Η ακριβής τιμή τους εξάτμισης σε κλάσμα βάρους του κρυογονικού προωθητικού ανά μέρα δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{w_v}{W} = \frac{q}{A} \frac{A}{V} \frac{24}{Qg\rho} \quad (3.18)$$

## 3.6 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΠΡΟΩΘΗΤΙΚΩΝ

Τα κρυογονικά προωθητικά έχουν μεγάλη συγκέντρωση και αντιδρούν πολύ εύκολα. Το υλικό από το οποίο κατασκευάζεται το δοχείο μεταφοράς τους πρέπει να είναι κατάλληλα επιλεγμένο ώστε να αποτραπεί διάβρωση ή επαφή με οργανικά στοιχεία. Μεταφέρεται στην ίδια δεξαμενή διαχωρισμένο μέσω διαφράγματος το καύσιμο από το οξειδωτικό μέσο, είτε μεταφέρονται σε ξεχωριστές δεξαμενές. Τους, είναι δυνατή η αύξηση τους πυκνότητας με ψύξη του υδρογόνου κάτω από το κανονικό σημείο βρασμού του, άρα σε λιγότερο χώρο μπορεί να αποθηκευθεί περισσότερο καύσιμο. Για μεταφορά προωθητικού στο διάστημα, είναι προτιμότερο να βρίσκεται σε στέρεα κατάσταση, και να υγροποιηθεί ξανά όταν χρειαστεί.

### 3.7 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ

Οι δεξαμενές αποτελούν μέρος του οχήματος. Ο εσωτερικός όγκος τους είναι ίσος με τον όγκο του προωθητικού σε κανονική θερμοκρασία, με υπόψη τον όγκο του προωθητικού που διαφεύγει με τη μορφή ατμού (boil-off) κατά τη διάρκεια γεμίσματος μέχρι την εκτόξευση. Η δεξαμενή δέχεται πίεση από το ρευστό και τα φορτία που δέχεται το όχημα. Η δεξαμενή περιλαμβάνει ένα εσωτερικό και ένα εξωτερικό δοχείο, στο διάστημα των οποίων υπάρχει μόνωση ώστε να αποφευχθεί μεταφορά θερμότητας στο ρευστό. Για προστασία από την ακτινοβολία του ηλίου και από τη μηχανή χρησιμοποιούνται σκεπάσματα. Τέλος, η διαρροή θερμότητας από αγωγή των μερών που αποτελούν τη δεξαμενή αντιμετωπίζεται με χρησιμοποίηση ροδελών χαμηλής αγωγιμότητας.

## 3.8 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΙΕΣΗΣ

Κατά την εκκίνηση τους μηχανής οι δεξαμενές δέχονται συμπίεση με ήλιο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στην άνοδο μετά την απογείωση η δεξαμενή του υγρού υδρογόνου συμπιέζεται από αέριο υδρογόνο τους μηχανής και η δεξαμενή του υγρού οξυγόνου από αέριο ήλιο. Το αέριο ήλιο έχει προηγουμένως αποθηκευτεί σε δοχεία και θερμάνθηκε με εναλλάκτη θερμότητας από τη μηχανή. Οι πιέσεις τους δεξαμενές ελέγχονται από βαλβίδες.

## 3.9 ΑΣΦΑΛΕΙΑ

Η ασφάλεια είναι βασικό μέλημα τους διασφάλιση στην περίπτωση των προωθητικών. Τα οξειδωτικά μέσα αν έρθουν σε επαφή με εύφλεκτα υλικά μπορούν να προκαλέσουν πυρκαγιά ή σοβαρά εγκαύματα στην περίπτωση επαφής με άνθρωπο. Τους πυρκαγιά μπορεί να προκληθεί από επαφή καυσίμου-οξειδωτικού μέσου ή κατά τη διαδικασία μεταφοράς υγρού οξυγόνου. Συνήθως για την πρόληψη αυτών τα μέσα με τα οποία μεταφέρονται τα υλικά έχουν εκκαθαριστεί με ήλιο. Τους τα αέρια που είναι αποθηκευμένα σε υψηλή πίεση και η θέρμανση κρυογονικών ρευστών τα οποία βρίσκονται σε περιορισμένο χώρο είναι πηγές κινδύνου. Για την αντιμετώπισή τους υπάρχουν βαλβίδες ανακούφισης που ενεργοποιούνται σε περίπτωση αύξησης τους πίεσης κατά 10%. Ακόμα υπάρχει πρόληψη για διαρροή υδρογόνου στο σύστημα αερισμού.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα πραγματοποιηθεί μοντελοποίηση μέσω Matlab των βασικών μεθόδων κρυογονικής υγροποίησης με άζωτο ως εργαζόμενο μέσο. Οι τους αυτές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιήσουν, αντί αζώτου, οξυγόνο ή αργό.

## 4.1 ΜΕΘΟΔΟΣ SIMPLE LINDE-HAMPSON

Αρχικά θεωρείται δεδομένη η είσοδος του συστήματος με πίεση 1 atm και θερμοκρασία 300 Κ. Επιπλέον, δεδομένη θεωρείται η πίεση μετά τον συμπιεστή στη θέση 2, ίση με 200 atm. Έπειτα, θεωρείται μια διαφορά θερμοκρασίας στον εναλλάκτη ίση με 1 Κ, η οποία μεταβάλλεται κατά 0.01 σε κάθε επανάληψη, μέχρι το πρόγραμμα να συγκλίνει. Σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν το τελευταίο σημείο με το πρώτο έχουν ίδια πίεση, θερμοκρασία και εντροπία. Επειδή σε πραγματικές συνθήκες, η απόλυτη ταύτισή τους είναι πρακτικά αδύνατη, σαν κριτήριο σύγκλισης ορίστηκε η διαφορά των ενθαλπιών τους να είναι μικρότερη από 10 kJ/kg, πρακτικά αμελητέα δηλαδή. Το κριτήριο αυτό, καθώς και οι είσοδοι αφορούν τους τους μεθόδους που παρατίθενται παρακάτω.

Εφόσον γνωρίζουμε δυο θερμοκρασιακά μεγέθη σε κάθε θέση(πίεση, θερμοκρασία, ενθαλπία, εντροπία), τα υπόλοιπα δυο μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση Coolprop τους Matlab, για άζωτο ως μέσο.

- Για το σημείο 2 γνωρίζουμε την πίεση, καθώς και τη θερμοκρασία του, καθώς θεωρείται ισοθερμοκρασιακή συμπίεση.
- Για το σημείο 3 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με τους 2, καθώς και τη θερμοκρασία, με τη διαφορά θερμοκρασίας που έχουμε ορίσει στην αρχή του προγράμματος.
- Για το σημείο 4, γνωρίζουμε την ενθαλπία του, η οποία είναι ίδια με τους 3, καθώς πραγματοποιείται ισενθαλπικός στραγγαλισμός μέχρι πιέσεως ίσης με την ατμοσφαιρική. Επομένως, γνωρίζουμε την πίεσή του. Επειδή στο σημείο αυτό έχουμε μείγμα, μέσω τους συνάρτησης Coolprop μπορούμε να βρούμε το ποσοστό του ατμού και του υγρού.
- Για τα σημεία 5 και 6, γνωρίζουμε την πίεσή τους, η οποία είναι ίδια με το σημείο 4, καθώς και την κατάστασή τους
  - ( κορεσμένο υγρό και κορεσμένος ατμός αντίστοιχα).
- Για το σημείο 7 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με τα 5 και 6. Η ενθαλπία θα προκύψει με ισολογισμό ενέργειας στον εναλλάκτη θερμότητας:

$$h_7 = \frac{h_2 - h_3}{Q_4} + h_6 \quad (4.1)$$

Όπου  $Q_4$  το ποσοστό του ατμού στο σημείο 4 όπου έχουμε μείγμα.

- Το κλάσμα μάζας y δίνεται από τον τύπο:  $y = \frac{h_1 h_2}{h_1 h_5}$
- Το έργο υγροποίησης W<sub>l</sub> δίνεται από τον τύπο:  $W_l = \frac{T_1 \cdot (s_1 s_2) (h_1 h_2)}{v}$
- Το FOM δίνεται από τον τύπο: FOM =  $749/W_1$

Όπου 749 kJ/kg είναι το απαιτούμενο ιδανικό έργο υγροποίησης κατά μάζα.

Το ζητούμενο διάγραμμα Τ-s που προέκυψε είναι το εξής:



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα T-s μεθόδου Simple Linde-Hampson

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε σημείο παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

ΘΕΣΗ	ΠΙΕΣΗ(atm)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ(Κ)	ENΘΑΛΠΙΑ(kJ/kg)	ENTPOIIA(kJ/kgK)
1	1	300	311.1964	6.8457
2	200	300	279.1091	5.1630
3	200	206.4700	141.4849	4.6083
4	1	77.2435	141.4849	4.4157
5	1	77.2435	-122.2468	2.8312
6	1	77.2435	77.0728	5.4116
7	1	300	311.1964	6.8457
FOM			0.1173	
W <sub>I</sub> (kJ/kg)			6385.4	

Πίνακας 4.1: Θερμοδυναμικά μεγέθη κάθε σημείου, FOM και W<sub>I</sub> για τη μέθοδο Simple Linde-Hampson

## 4.2 ΜΕΘΟΔΟΣ PRECOOLED LINDE-HAMPSON

Αρχικά θεωρείται δεδομένη η είσοδος του συστήματος με πίεση 1 atm και θερμοκρασία 300 Κ. Επιπλέον, δεδομένη θεωρείται η πίεση μετά τον συμπιεστή στη θέση 2, ίση με 200 atm.Επιπλέον, δίνεται για το εξωτερικό ψυκτικό h<sub>11</sub>=207.94 J/g, h<sub>12</sub>=250.2 J/g, h<sub>13</sub>=h<sub>14</sub>=61.23 J/g καθώς και ότι ο λόγος της μάζας του εξωτερικού ψυκτικού προς το εργαζόμενο μέσο είναι ίσος με x=0.2. Η διαδικασία είναι όμοια.

- Για το σημείο 2 γνωρίζουμε πίεση και θερμοκρασία.
- Για το σημείο 3 γνωρίζουμε πίεση και η θερμοκρασία είναι ίδια με του σημείου 2, • αφού έχουμε ισοθερμοκρασιακή συμπίεση.
- Για το σημείο 4 γνωρίζουμε την πίεση, ίδια με του 3, καθώς και τη θερμοκρασία με τη διαφορά θερμοκρασίας που έχουμε ορίσει στην αρχή του προγράμματος.
- Για το σημείο 5 γνωρίζουμε την ενθαλπία του, που είναι ίση με του σημείου 4, καθώς πραγματοποιείται ισενθαλπικός στραγγαλισμός μέχρι πιέσεως ίσης με την ενδιάμεση των 5 atm. Επομένως, γνωρίζουμε την πίεσή του. Επειδή στο σημείο αυτό έχουμε μείγμα, μέσω της συνάρτησης Coolprop μπορούμε να βρούμε το ποσοστό του ατμού και του υγρού.
- Για το σημείο 7, γνωρίζουμε την πίεσή του, που είναι ίδια με του 5, καθώς και την κατάστασή του, που είναι κορεσμένου ατμού.
- Για το σημείο 8, γνωρίζουμε την πίεσή του, που είναι ίδια με του 7. Η ενθαλπία θα • προκύψει με ισολογισμό ενέργειας στον εναλλάκτη θερμότητας:

$$h_8 = \frac{h_3 - h_4}{Q_5} + h_7 \quad (4.2)$$

Όπου  $Q_5\,$  το ποσοστό του ατμού στο σημείο 5, όπου έχουμε μείγμα.

Για το σημείο 9 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με του σημείου 8. Η • ενθαλπία θα προκύψει με ισολογισμό ενέργειας στον εναλλάκτη θερμότητας:

$$h_9 = \frac{(h_2 - h_3) - x \cdot (h_{11} - h_{14})}{Q_5} + h_8 \quad (4.3)$$

Όπου  $Q_5$  το ποσοστό του ατμού στο σημείο 5 όπου έχουμε μείγμα.

- Το κλάσμα μάζας γ δίνεται από τον τύπο: y = <sup>h<sub>1</sub>-h<sub>2</sub></sup>/<sub>h<sub>1</sub>-h<sub>6</sub></sub> + x · <sup>h<sub>11</sub>-h<sub>12</sub></sup>/<sub>h<sub>1</sub>-h<sub>6</sub></sub>
   Tο έργο υγροποίησης W<sub>l</sub> δίνεται από τον τύπο: W<sub>l</sub> = <sup>T<sub>1</sub>·(s<sub>1</sub>-s<sub>2</sub>)-(h<sub>1</sub>-h<sub>2</sub>)+x·(h<sub>12</sub>-h<sub>11</sub>)</sup>/y
   y
- To FOM δίνεται από τον τύπο:  $FOM = 749/W_1$

Όπου 749 kJ/kg είναι το απαιτούμενο ιδανικό έργο υγροποίησης κατά μάζα.

Το ζητούμενο διάγραμμα Τ-s που προέκυψε είναι το εξής:



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα T-s μεθόδου Precooled Linde-Hampson

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε σημείο παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

ΘΕΣΗ	ΠΙΕΣΗ(atm)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ(Κ)	ENΘAΛΠIA(kJ/kg)	ENTPOIIA(kJ/kgK)
1	1	300	311.1964	6.8457
2	200	300	279.1091	5.1630
3	200	298.0300	276.5397	5.1544
4	200	296.0600	273.9615	5.1457
5	1	77.2435	273.9615	4.4174
6	1	77.2435	-122.2468	2.8312
7 1		77.2435	77.0728	5.4116
8	1	81.0037	81.2671	5.4647
9 1		300	311.1964	6.8457
FOM			0.1173	
W <sub>I</sub> (kJ/kg)			63	87.2

## Πίνακας 4.2: Θερμοδυναμικά μεγέθη κάθε σημείου, FOM και W<sub>I</sub> για τη μέθοδο Precooled Linde-Hampson

## 4.3 MEΘΟΔΟΣ DUAL PRESSURE LINDE-HAMPSON

Αρχικά θεωρείται δεδομένη η είσοδος του συστήματος με πίεση 1 atm και θερμοκρασία 300 Κ. Στο σημείο 2 η πίεση είναι 25 atm και στο σημείο 3 100 atm. Επιπλέον, θεωρείται ότι ο λόγος της μάζας του κορεσμένου ατμού που επιστρέφει στο σημείο 8 σε σχέση με τη συνολική είναι 0.2. Η διαδικασία είναι όμοια.

- Για το σημείο 2 γνωρίζουμε πίεση και θερμοκρασία.
- Για το σημείο 3 γνωρίζουμε πίεση και η θερμοκρασία είναι ίδια με του σημείου 2, αφού έχουμε ισοθερμοκρασιακή συμπίεση.
- Για το σημείο 4 γνωρίζουμε την πίεση, ίδια με του 3, καθώς και τη θερμοκρασία με τη διαφορά θερμοκρασίας που έχουμε ορίσει στην αρχή του προγράμματος.
- Για το σημείο 5 γνωρίζουμε την ενθαλπία του, που είναι ίση με του σημείου 4, καθώς πραγματοποιείται ισενθαλπικός στραγγαλισμός μέχρι πιέσεως ίσης με την ενδιάμεση των 5 atm. Επομένως, γνωρίζουμε την πίεσή του. Επειδή στο σημείο αυτό έχουμε μείγμα, μέσω της συνάρτησης Coolprop μπορούμε να βρούμε το ποσοστό του ατμού και του υγρού.
- Για το σημείο 6, γνωρίζουμε την πίεσή του, που είναι ίδια με του 5, καθώς και την κατάστασή του, που είναι κορεσμένου υγρού.
- Για το σημείο 8, γνωρίζουμε την πίεσή του, που είναι ίδια με του 5, καθώς και την κατάστασή του, που είναι κορεσμένου ατμού. Επίσης ξέρουμε το λόγο της μάζας του ρεύματος ατμού στη θέση αυτή προς τη συνολική, ίσος με 0.2.
- Για το σημείο 7 γνωρίζουμε την ενθαλπία του, που είναι ίση με του σημείου 6, καθώς πραγματοποιείται ισενθαλπικός στραγγαλισμός μέχρι πιέσεως ίσης με την ατμοσφαιρική. Επομένως, , γνωρίζουμε την πίεσή του. Επειδή στο σημείο αυτό έχουμε μείγμα, μέσω της συνάρτησης Coolprop μπορούμε να βρούμε το ποσοστό του ατμού και του υγρού.
- Για τα σημεία 9 και 10, γνωρίζουμε την πίεσή τους, η οποία είναι ίδια με το σημείο
   7, καθώς και την κατάστασή τους (κορεσμένο υγρό και κορεσμένος ατμός αντίστοιχα).
- Για το σημείο 11 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με του σημείου 10. Η ενθαλπία θα προκύψει με ισολογισμό ενέργειας στον εναλλάκτη θερμότητας:

$$h_{11} = \frac{(h_3 - h_4) - Q_5 \cdot x \cdot (h_2 - h_8)}{(Q_7 \cdot (1 - x) + x)} + h_{10} \quad (4.4)$$

Όπου  $Q_5, Q_7$  το ποσοστό του ατμού στα σημεία 5,7 όπου έχουμε μείγμα.

- Το κλάσμα μάζας γ δίνεται από τον τύπο:  $y = \frac{h_1 h_3}{h_1 h_9} x \cdot \frac{h_1 h_2}{h_1 h_9}$
- Το έργο υγροποίησης W<sub>l</sub> δίνεται από τον τύπο:  $W_l = \frac{T_1 \cdot (s_1 - s_3) - (h_1 - h_3) - x \cdot T_1 \cdot (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)}{y}$
- Το FOM δίνεται από τον τύπο: FOM =  $749/W_l$

Όπου 749 kJ/kg είναι το απαιτούμενο ιδανικό έργο υγροποίησης κατά μάζα.

Το ζητούμενο διάγραμμα Τ-s που προέκυψε είναι το εξής:



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα T-s μεθόδου Dual pressure Linde-Hampson

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε σημείο παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

ΘΕΣΗ	ΠΙΕΣΗ(atm)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ(Κ)	ENΘΑΛΠΙΑ(kJ/kg)	ENTPOIIA(kJ/kgK)
1	1	300	311.1964	6.8457
2	25	300	306.0280	5.8741
3	100	300	291.9329	5.4165
4	100	182.7400	127.9884	3.8847
5	25	119.9159	127.9884	4.0017
6	25	119.9159	-18.1811	3.8490
7	1	77.2435	-18.1811	4.1785
8	25	119.9159	74.3537	4.6207
9	1	77.2435	-122.2468	2.8312
10	1	77.2435	77.0728	5.4116
11 1		300	311.1964	6.8457
FOM			0.0894	
W <sub>I</sub> (kJ/kg)			83	74.4

Πίνακας 4.3: Θερμοδυναμικά μεγέθη κάθε σημείου, FOM και W <sub>1</sub> για τη μέθοδο Dual
pressure Linde-Hampson

## 4.4 ΜΕΘΟΔΟΣ SIMPLE CLAUDE

Αρχικά θεωρείται δεδομένη η είσοδος του συστήματος με πίεση 1 atm και θερμοκρασία 300 Κ. Επιπλέον, δεδομένη θεωρείται η πίεση μετά τον συμπιεστή στη θέση 2, ίση με 200 atm, καθώς και ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου ίσος με 0.75.

- Για το σημείο 2 γνωρίζουμε την πίεση, καθώς και τη θερμοκρασία του, καθώς θεωρείται ισοθερμοκρασιακή συμπίεση.
- Για το σημείο 3 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με της 2, καθώς και τη θερμοκρασία, με τη διαφορά θερμοκρασίας που έχουμε ορίσει στην αρχή του προγράμματος.
- Για το σημείο 4 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με της 3, καθώς και τη θερμοκρασία, με τη διαφορά θερμοκρασίας που έχουμε ορίσει στην αρχή του προγράμματος.
- Για το σημείο 5 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με της 4, καθώς και τη θερμοκρασία, με τη διαφορά θερμοκρασίας που έχουμε ορίσει στην αρχή του προγράμματος.
- Για το σημείο 6, γνωρίζουμε την ενθαλπία του, η οποία είναι ίδια με της 3, καθώς πραγματοποιείται ισενθαλπικός στραγγαλισμός μέχρι πιέσεως ίσης με την ατμοσφαιρική. Επομένως, γνωρίζουμε την πίεσή του. Επειδή στο σημείο αυτό έχουμε μείγμα, μέσω της συνάρτησης Coolprop μπορούμε να βρούμε το ποσοστό του ατμού και του υγρού.
- Για τα σημεία 7 και 8, γνωρίζουμε την πίεσή τους, η οποία είναι ίδια με το σημείο 4, καθώς και την κατάστασή τους (κορεσμένο υγρό και κορεσμένος ατμός αντίστοιχα).
- Για το σημείο 9 γνωρίζουμε την πίεσή του, καθώς είναι ίση με του 8. Με το Coolprop μπορούμε να βρούμε την ενθαλπία του για ισεντροπική αποτόνωση, με γνωστή την εντροπία του σημείου 3. Η πραγματική ενθαλπία θα προκύψει από τη σχέση:

$$h_9 = h_3 - n_{is}(h_3 - h_{9is}) \quad (4.5)$$

με  $n_{is}$ ,  $h_{9is}$  ισεντροπικός βαθμός απόδοσης και ενθαλπία για ισεντροπική αποτόνωση.

 Για το σημείο 10, γνωρίζουμε την πίεσή του, η οποία είναι ίδια με του 8. Η ενθαλπία θα προκύψει με ισολογισμό ενέργειας στον εναλλάκτη θερμότητας:

$$h_{10} = \frac{h_4 - h_5}{Q_6} + h_8 \quad (4.6)$$

Όπου  $Q_6$  το ποσοστό του ατμού στο σημείο 6 όπου έχουμε μείγμα.

 Για το σημείο 11, γνωρίζουμε την πίεσή του, η οποία είναι ίδια με του 10. Η ενθαλπία θα προκύψει με ισολογισμό ενέργειας στην ανάμειξη:

$$h_{11} = \frac{x \cdot h_9 + (1 - x) \cdot Q_6 \cdot h_{10}}{Q_6 \cdot (1 - x) + x} \quad (4.7)$$

Όπου  $Q_6$  το ποσοστό του ατμού στο σημείο 6 όπου έχουμε μείγμα.

 Για το σημείο 12 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με του 11. Η ενθαλπία θα προκύψει με ισολογισμό ενέργειας στον εναλλάκτη θερμότητας:

$$h_{12} = \frac{(h_3 - h_4) \cdot (1 - x)}{(Q_6 \cdot (1 - x) + x)} + h_{11} \quad (4.8)$$

Όπου  $Q_6$  το ποσοστό του ατμού στο σημείο 6 όπου έχουμε μείγμα.

 Για το σημείο 13 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με του 12. Η ενθαλπία θα προκύψει με ισολογισμό ενέργειας στον εναλλάκτη θερμότητας:

$$h_{13} = \frac{(h_2 - h_3) \cdot (1 - x)}{Q_6 \cdot (1 - x) + x} + h_{12} \quad (4.9)$$

Όπου  $Q_6$  το ποσοστό του ατμού στο σημείο 6 όπου έχουμε μείγμα.

- Το κλάσμα μάζας γ δίνεται από τον τύπο:  $y = \frac{h_1 h_2}{h_1 h_7} + x \cdot \frac{h_3 h_9}{h_1 h_7}$
- Το έργο υγροποίησης W<sub>l</sub> δίνεται από τον τύπο:  $W_l = \frac{T_1 \cdot (s_1 s_2) (h_1 h_2) x \cdot (h_3 h_9)}{v}$
- Το FOM δίνεται από τον τύπο:  $FOM = 749/W_l$

Όπου 749 kJ/kg είναι το απαιτούμενο ιδανικό έργο υγροποίησης κατά μάζα.

Το ζητούμενο διάγραμμα Τ-s που προέκυψε είναι το εξής:



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα T-s μεθόδου Simple Claude

ΘΕΣΗ	ΠΙΕΣΗ(atm)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ(Κ)	ENΘAΛΠIA(kJ/kg)	ENTPOIIA(kJ/kgK)
1	1	300	311.1964	6.8457
2	200	300	279.1091	5.1630
3	200	261.5000	227.0107	4.9770
4	200	223.0000	169.0995	4.7370
5	200	184.5000	101.5549	4.4036
6	1	77.2435	101.5549	4.4152
7	1	77.2435	-122.2468	2.8312
8	1	77.2435	77.0728	5.4116
9	1	88.3891	89.3753	5.5605
10	1	180.9467	187.1108	6.3186
11	1	153.9072	158.8253	6.1493
12	1	218.0845	225.8654	6.5134
13 1		300	311.1964	6.8457
FOM			0.2314	
W <sub>i</sub> (kJ/kg)			32	36.8

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε σημείο παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

### Πίνακας 4.4: Θερμοδυναμικά μεγέθη κάθε σημείου, FOM και W<sub>I</sub> για τη μέθοδο Simple Claude

### 4.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΡΙΤΖΑ

Αρχικά θεωρείται δεδομένη η είσοδος του συστήματος με πίεση 1 atm και θερμοκρασία 300 Κ. Επιπλέον, δεδομένη θεωρείται η πίεση μετά τον συμπιεστή στη θέση 2, ίση με 200 atm, ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου ίσος με 0.75 και το κλάσμα μάζας είναι ίσο με x=0.2.

- Για το σημείο 2 γνωρίζουμε την πίεση, καθώς και τη θερμοκρασία του, καθώς θεωρείται ισοθερμοκρασιακή συμπίεση.
- Για το σημείο 3 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με της 2, καθώς και τη θερμοκρασία, με τη διαφορά θερμοκρασίας που έχουμε ορίσει στην αρχή του προγράμματος.
- Για το σημείο 4 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με της 3, καθώς και τη θερμοκρασία, με τη διαφορά θερμοκρασίας που έχουμε ορίσει στην αρχή του προγράμματος.
- Για το σημείο 5, γνωρίζουμε την ενθαλπία του, η οποία είναι ίδια με της 4, καθώς πραγματοποιείται ισενθαλπικός στραγγαλισμός μέχρι πιέσεως ίσης με την ατμοσφαιρική. Επομένως, γνωρίζουμε την πίεσή του. Επειδή στο σημείο αυτό έχουμε μείγμα, μέσω της συνάρτησης Coolprop μπορούμε να βρούμε το ποσοστό του ατμού και του υγρού.

- Για τα σημεία 6 και 8, γνωρίζουμε την πίεσή τους, η οποία είναι ίδια με το σημείο 4, • καθώς και την κατάστασή τους (κορεσμένο υγρό και κορεσμένος ατμός αντίστοιχα).
- Για το σημείο 7 γνωρίζουμε την πίεσή του, καθώς είναι ίση με του 8. Με το • Coolprop μπορούμε να βρούμε την ενθαλπία του για ισεντροπική αποτόνωση, με γνωστή την εντροπία του σημείου 3. Η πραγματική ενθαλπία θα προκύψει από τη σχέση:

$$h_7 = h_3 - n_{is}(h_3 - h_{7is}) \quad (4.10)$$

με  $n_{is}$ ,  $h_{7is}$  ισεντροπικός βαθμός απόδοσης και ενθαλπία για ισεντροπική αποτόνωση.

Για το σημείο 9, γνωρίζουμε την πίεσή του, η οποία είναι ίδια με του 8. Η ενθαλπία • θα προκύψει με ισολογισμό ενέργειας στην ανάμειξη:

$$h_9 = \frac{x \cdot h_7 + (1 - x) \cdot Q_5 \cdot h_8}{Q_5 \cdot (1 - x) + x} \qquad (4.11)$$

Όπου  $Q_5$  το ποσοστό του ατμού στο σημείο 5 όπου έχουμε μείγμα.

Για το σημείο 10 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με του 9. Η ενθαλπία θα • προκύψει με ισολογισμό ενέργειας στον εναλλάκτη θερμότητας:

$$h_{10} = \frac{(h_3 - h_4) \cdot (1 - x)}{Q_5 \cdot (1 - x) + x} + h_9 \quad (4.12)$$

Όπου  $Q_5$  το ποσοστό του ατμού στο σημείο 6 όπου έχουμε μείγμα.

Για το σημείο 11 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με του 10. Η ενθαλπία θα • προκύψει με ισολογισμό ενέργειας στον εναλλάκτη θερμότητας:

$$h_{11} = \frac{(h_2 - h_3)}{Q_5 \cdot (1 - x) + x} + h_{10} \quad (4.13)$$

Όπου  $Q_6$  το ποσοστό του ατμού στο σημείο 6 όπου έχουμε μείγμα.

- Το κλάσμα μάζας γ δίνεται από τον τύπο: y = <sup>h<sub>1</sub>-h<sub>2</sub></sup>/<sub>h<sub>1</sub>-h<sub>6</sub></sub> + x · <sup>h<sub>3</sub>-h<sub>7</sub></sup>/<sub>h<sub>1</sub>-h<sub>6</sub></sub>

   Το έργο υγροποίησης W<sub>l</sub> δίνεται από τον τύπο: W<sub>l</sub> = <sup>T<sub>1</sub>·(s<sub>1</sub>-s<sub>2</sub>)-(h<sub>1</sub>-h<sub>2</sub>)-x·(h<sub>3</sub>-h<sub>7</sub>)</sup>/<sub>y</sub>
- Το FOM δίνεται από τον τύπο: FOM = 749/W<sub>1</sub>

Όπου 749 kJ/kg είναι το απαιτούμενο ιδανικό έργο υγροποίησης κατά μάζα.

Το ζητούμενο διάγραμμα Τ-s που προέκυψε είναι το εξής:



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα T-s μεθόδου Kapitza

Όπου εδώ τα σημεία 7,8,9 δεν ταυτίζονται, αλλά η διαφορά των τιμών τους είναι ελάχιστη. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε σημείο παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

ΘΕΣΗ	ΠΙΕΣΗ(atm)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ(Κ)	ENΘΑΛΠΙΑ(kJ/kg)	ENTPOIIA(kJ/kgK)
1	1	300	311.1964	6.8457
2	200	300	279.1091	5.1630
3	200	243.1700	200.3790	4.8713
4	200	186.3400	105.0383	4.4224
5	200	102.9282	105.0383	5.7246
6	1	77.2435	-122.2468	2.8312
7	1	77.2435	76.5984	5.4055
8	1	77.2435	77.0728	5.4116
9	1	77.2435	76.9355	5.4099
10	1	181.1307	187.3030	6.3197
11 1		300	311.1964	6.8457
FOM			0.2193	
	W <sub>l</sub> (kJ/kg)			15.7

Πίνακας 4.5: Θερμοδυναμικά μεγέθη κάθε σημείου, FOM και W<sub>I</sub> για τη μέθοδο Kapitza

## 4.6 ΜΕΘΟΔΟΣ DUAL PRESSURE CLAUDE

Αρχικά θεωρείται δεδομένη η είσοδος του συστήματος με πίεση 1 atm και θερμοκρασία 300 Κ. Επιπλέον, δεδομένη θεωρείται η πίεση μετά τον συμπιεστή στο σημείο 2, ίση με 20 atm, ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου ίσος με 0.75 και το κλάσμα μάζας του ρεύματος που κατευθύνεται στο στρόβιλο σε σχέση με το συνολικό είναι ίσο με x=0.2. Επίσης, , δεδομένη θεωρείται η πίεση μετά το δεύτερο συμπιεστή στο σημείο 3, ίση με 200 atm, καθώς και η θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο, στο σημείο 14, ίση με 198 Κ.

- Για το σημείο 2 γνωρίζουμε την πίεση και τη θερμοκρασία του, καθώς θεωρείται ισοθερμοκρασιακή συμπίεση.
- Για το σημείο 3 γνωρίζουμε την πίεση, καθώς και τη θερμοκρασία, με τη διαφορά θερμοκρασίας που έχουμε ορίσει στην αρχή του προγράμματος.
- Για το σημείο 4 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με της 3, καθώς και τη θερμοκρασία, με τη διαφορά θερμοκρασίας που έχουμε ορίσει στην αρχή του προγράμματος.
- Για το σημείο 5 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με της 4, καθώς και τη θερμοκρασία, με τη διαφορά θερμοκρασίας που έχουμε ορίσει στην αρχή του προγράμματος.
- Για το σημείο 6 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με της 5, καθώς και τη θερμοκρασία, με τη διαφορά θερμοκρασίας που έχουμε ορίσει στην αρχή του προγράμματος.
- Για το σημείο 7, γνωρίζουμε την ενθαλπία του, η οποία είναι ίδια με της 6, καθώς πραγματοποιείται ισενθαλπικός στραγγαλισμός μέχρι πιέσεως ίσης με την ατμοσφαιρική. Επομένως, γνωρίζουμε την πίεσή του. Επειδή στο σημείο αυτό έχουμε μείγμα, μέσω της συνάρτησης Coolprop μπορούμε να βρούμε το ποσοστό του ατμού και του υγρού.
- Για τα σημεία 8 και 9, γνωρίζουμε την πίεσή τους, η οποία είναι ίδια με το σημείο 7, καθώς και την κατάστασή τους (κορεσμένο υγρό και κορεσμένος ατμός αντίστοιχα).
- Για το σημείο 14 γνωρίζουμε την πίεσή του, η οποία είναι ίδια με του σημείου 2, καθώς και τη θερμοκρασία του από τα δεδομένα.
- Για το σημείο 10 γνωρίζουμε την πίεσή του, καθώς είναι ίση με του 8. Με το Coolprop μπορούμε να βρούμε την ενθαλπία του για ισεντροπική αποτόνωση, με γνωστή την εντροπία του σημείου 14. Η πραγματική ενθαλπία θα προκύψει από τη σχέση:

$$h_{10} = h_{14} - n_{is}(h_{10} - h_{14is}) \quad (4.14)$$

με  $n_{is}$ ,  $h_{14is}$  ισεντροπικός βαθμός απόδοσης και ενθαλπία για ισεντροπική αποτόνωση.

 Για το σημείο 11 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με του 9. Η ενθαλπία θα προκύψει με ισολογισμό ενέργειας στον εναλλάκτη θερμότητας:

$$h_{11} = \frac{(h_5 - h_6)}{Q_7} + h_9 \quad (4.15)$$

Όπου  $Q_7$  το ποσοστό του ατμού στο σημείο 7 όπου έχουμε μείγμα.

 Για το σημείο 12, γνωρίζουμε την πίεσή του, η οποία είναι ίδια με του 8. Η ενθαλπία θα προκύψει με ισολογισμό ενέργειας στην ανάμειξη:

$$h_{12} = \frac{x \cdot h_{10} + (1 - x) \cdot Q_7 \cdot h_{11}}{Q_7 \cdot (1 - x) + x} \quad (4.16)$$

Όπου  $Q_7$  το ποσοστό του ατμού στο σημείο 7 όπου έχουμε μείγμα.

 Για το σημείο 13 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με του 12. Η ενθαλπία θα προκύψει με ισολογισμό ενέργειας στον εναλλάκτη θερμότητας:

$$h_{13} = \frac{(h_4 - h_5) \cdot (1 - x)}{Q_7 \cdot (1 - x) + x} + h_{12} \quad (4.17)$$

Όπου  $Q_7$  το ποσοστό του ατμού στο σημείο 7 όπου έχουμε μείγμα.

 Για το σημείο 15 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με του 13. Η ενθαλπία θα προκύψει με ισολογισμό ενέργειας στον εναλλάκτη θερμότητας:

$$h_{15} = \frac{(1-x)\cdot(h_3-h_4) + x\cdot(h_{14}-h_2)}{Q_7\cdot(1-x) + x} + h_{13} \quad (4.18)$$

Όπου  $Q_7$  το ποσοστό του ατμού στο σημείο 7 όπου έχουμε μείγμα.

- Το κλάσμα μάζας γ δίνεται από τον τύπο:  $y = \frac{h_1 h_3}{h_1 h_8} + x \cdot \frac{h_3 h_{10}}{h_1 h_8}$
- Το έργο υγροποίησης W<sub>l</sub> δίνεται από τον τύπο:  $W_l = \frac{T_1 \cdot (s_1 - s_3) - (h_1 - h_3) - x \cdot T_1 \cdot (s_2 - s_3) - (h_2 - h_3) + (h_{14} - h_{10})}{y}$
- Το FOM δίνεται από τον τύπο: FOM =  $749/W_l$

Όπου 749 kJ/kg είναι το απαιτούμενο ιδανικό έργο υγροποίησης κατά μάζα.

Το ζητούμενο διάγραμμα Τ-s που προέκυψε είναι το εξής:



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα T-s μεθόδου Dual pressure Claude

ΘΕΣΗ	ΠΙΕΣΗ(atm)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ(Κ)	ENΘΑΛΠΙΑ(kJ/kg)	ENTPOПIA(kJ/kgK)
1	1	300	311.1964	6.8457
2	10	300	309.2273	6.1561
3	200	256.7500	220.2475	4.9509
4	200	213.5000	153.4727	3.7593
5	200	170.0700	73.8845	3.7587
6	200	127.0000	-12.0104	3.7580
7	1	77.2435	-12.0104	4.2584
8	1	77.2435	-122.2468	2.8312
9	1	77.2435	77.0728	5.4116
10	1	77.2435	30.8772	4.8136
11	1	209.7129	217.1356	4.4167
12	1	158.0791	163.1952	6.1773
13	1	246.4147	255.3901	6.6407
14	10	198.0000	200.4057	4.0820
15 1		300	311.1964	6.8457
FOM			0.5722	
W <sub>I</sub> (kJ/kg)			13	309

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε σημείο παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.6: Θερμοδυναμικά μεγέθη κάθε σημείου, FOM και W <sub>1</sub> για τη μέθοδο Dual
pressure Claude

## 4.7 ΜΕΘΟΔΟΣ HEYLANDT

Αρχικά θεωρείται δεδομένη η είσοδος του συστήματος με πίεση 1 atm και θερμοκρασία 300 Κ. Επιπλέον, δεδομένη θεωρείται η πίεση μετά τον συμπιεστή στη θέση 2, ίση με 200 atm, ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου ίσος με 0.75 και το κλάσμα μάζας του ρεύματος που κατευθύνεται στο στρόβιλο σε σχέση με το συνολικό είναι ίσο με x=0.2.

- Για το σημείο 2 γνωρίζουμε την πίεση, καθώς και τη θερμοκρασία του, καθώς θεωρείται ισοθερμοκρασιακή συμπίεση.
- Για το σημείο 3 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με της 2, καθώς και τη θερμοκρασία, με τη διαφορά θερμοκρασίας που έχουμε ορίσει στην αρχή του προγράμματος.
- Για το σημείο 4 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με της 3, καθώς και τη θερμοκρασία, με τη διαφορά θερμοκρασίας που έχουμε ορίσει στην αρχή του προγράμματος.
- Για το σημείο 5, γνωρίζουμε την ενθαλπία του, η οποία είναι ίδια με της 4, καθώς πραγματοποιείται ισενθαλπικός στραγγαλισμός μέχρι πιέσεως ίσης με την ατμοσφαιρική. Επομένως, γνωρίζουμε την πίεσή του. Επειδή στο σημείο αυτό έχουμε μείγμα, μέσω της συνάρτησης Coolprop μπορούμε να βρούμε το ποσοστό του ατμού και του υγρού.
- Για τα σημεία 6 και 7, γνωρίζουμε την πίεσή τους, η οποία είναι ίδια με το σημείο 5, καθώς και την κατάστασή τους (κορεσμένο υγρό και κορεσμένος ατμός αντίστοιχα).
- Για το σημείο 9 γνωρίζουμε την πίεσή του, καθώς είναι ίση με του 7. Με το Coolprop μπορούμε να βρούμε την ενθαλπία του για ισεντροπική αποτόνωση, με γνωστή την εντροπία του σημείου 2. Η πραγματική ενθαλπία θα προκύψει από τη σχέση:

$$h_9 = h_2 - n_{is}(h_2 - h_{9is}) \quad (4.19)$$

με  $n_{is}$ ,  $h_{9is}$  ισεντροπικός βαθμός απόδοσης και ενθαλπία για ισεντροπική αποτόνωση.

 Για το σημείο 8 γνωρίζουμε την πίεσή του, καθώς είναι ίση με του 7. Η ενθαλπία θα προκύψει με ισολογισμό ενέργειας στον εναλλάκτη θερμότητας:

$$h_8 = \frac{h_3 - h_4}{Q_5} + h_7 \quad (4.20)$$

Όπου  $Q_5$  το ποσοστό του ατμού στο σημείο 5 όπου έχουμε μείγμα.

 Για το σημείο 10, γνωρίζουμε την πίεσή του, η οποία είναι ίδια με του 8. Η ενθαλπία θα προκύψει με ισολογισμό ενέργειας στην ανάμειξη:

$$h_{10} = \frac{x \cdot h_9 + (1 - x) \cdot Q_5 \cdot h_8}{Q_5 \cdot (1 - x) + x} \quad (4.21)$$

Όπου  $Q_5$  το ποσοστό του ατμού στο σημείο 5 όπου έχουμε μείγμα.

 Για το σημείο 11 γνωρίζουμε την πίεση, η οποία είναι ίδια με του 10. Η ενθαλπία θα προκύψει με ισολογισμό ενέργειας στον εναλλάκτη θερμότητας:

$$h_{11} = \frac{(h_2 - h_3) \cdot (1 - x)}{Q_5 \cdot (1 - x) + x} + h_{10} \quad (4.22)$$

Όπου  $Q_5$  το ποσοστό του ατμού στο σημείο 5 όπου έχουμε μείγμα.

- Το κλάσμα μάζας γ δίνεται από τον τύπο:  $y = \frac{h_1 h_3}{h_1 h_6} + x \cdot \frac{h_3 h_9}{h_1 h_6}$
- Το έργο υγροποίησης W<sub>1</sub> δίνεται από τον τύπο:  $W_l = \frac{T_1 \cdot (s_1 - s_3) - (h_1 - h_3) - x \cdot (T_1 \cdot (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)) + (h_3 - h_9)}{y}$
- Το FOM δίνεται από τον τύπο: FOM =  $749/W_l$

Όπου 749 kJ/kg είναι το απαιτούμενο ιδανικό έργο υγροποίησης κατά μάζα.



Το ζητούμενο διάγραμμα Τ-s που προέκυψε είναι το εξής:



Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε σημείο παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

ΘΕΣΗ	ΠΙΕΣΗ(atm)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ(Κ)	ENΘΑΛΠΙΑ(kJ/kg)	ENTPOПIA(kJ/kgK)
1	1	300	311.1964	6.8457
2	200	300	279.1091	5.1630
3	200	240.4100	196.2337	4.8542
4	200	180.8200	94.5200	4.3651
5	200	77.2435	94.5200	4.4151
6	1	77.2435	-122.2468	2.8312
7	1	77.2435	77.0728	5.4116
8	1	234.3175	242.7857	6.5883
9	1	110.5696	113.1775	5.8009
10	1	198.3433	205.2744	6.4145
11 1		300	311.1964	6.8457
FOM			0.6123	
W <sub>I</sub> (kJ/kg)			1223.2	

Πίνακας 4.7: Θερμοδυναμικά μεγέθη κάθε σημείου, FOM και W <sub>I</sub> για τη μέθοδο
Heylandt

ΜΕΘΟΔΟΣ	FOM	W <sub>I</sub> (kJ/kg)
Simple Linde-Hampson	0.1173	6385.4
Precooled Linde-	0.1173	6387.2
Hampson		
Dual pressure Linde-	0.0894	8374.4
Hampson		
Simple Claude	0.2314	3236.8
Kapitza	0.2193	3415.7
Dual pressure Claude	0.5722	1309
Heylandt	0.6123	1223.2

Πίνακας 4.8: FOM και W<sub>1</sub> για κάθε μέθοδο

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το υπολογιστικό μέρος της διπλωματικής αφορούσε τη μοντελοποίηση των βασικών μεθόδων κρυογονικής υγροποίησης, με άζωτο ως εργαζόμενο μέσο.

Παρατηρείται πως για την ίδια πίεση εισόδου και για όμοιες περιοχές τιμών πίεσης και κλασμάτων μάζας, ο συντελεστής κέρδους και το έργο κατά υγροποιημένης μάζας διαφέρουν σημαντικά.

Συγκεκριμένα, η μέθοδος Linde-Hampson με τις παραλλαγές της έχει μικρό συντελεστή κέρδους, ενώ παράλληλα απαιτεί μεγάλο έργο κατά υγροποιημένης μάζας. Επιπλέον, οι παραλλαγές της μεθόδου αυτής όχι μόνο δε βελτιώνουν το συντελεστή κέρδους, αλλά αυξάνουν και το έργο. Αντίθετα, στις υπόλοιπες μεθόδους ο συντελεστής αυξάνει σημαντικά με ταυτόχρονη μείωση του έργου. Είναι ευδιάκριτη η βελτίωση της μεθόδου Simple Claude όταν χρησιμοποιούνται δυο συμπιεστές στην παραλλαγή της(dual pressure), ενώ είναι προφανές πως για τα συγκεκριμένα δεδομένα εισόδου η μέθοδος Heylandt έχει το μεγαλύτερο συντελεστή κέρδους και το μικρότερο έργο κατά μάζα. Επιπλέον, αποτυπώνεται στην ελάχιστη διαφορά των τιμών τους το γεγονός ότι η μέθοδος Kapitza είναι παραλλαγή της μεθόδου Claude.

Συμπερασματικά, τα δυο μεγέθη είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με τις συνθήκες εισόδου, τις πιέσεις που επιτυγχάνουν οι συμπιεστές των κυκλωμάτων, καθώς και των τιμών των κλασμάτων μάζας. Στην παρούσα διπλωματική σκόπιμα επιλέχθηκαν ίδιες συνθήκες εισόδου, ίδιες τιμές κλασμάτων μάζας αλλά και κοντινές περιοχές πίεσης, ώστε να αποτυπωθεί στα αποτελέσματα η διαφορά των δυο μεγεθών ανάλογα με τη χρησιμοποίηση της εκάστοτε μεθόδου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στην παρούσα διπλωματική μοντελοποιήθηκαν οι βασικές μέθοδοι κρυογονικής υγροποίησης με άζωτο ως εργαζόμενο μέσο. Περαιτέρω ανάλυση μπορεί να γίνει για διάφορα εργαζόμενα μέσα, τα οποία διέπονται από διαφορετικές ιδιότητες και αντιδρούν διαφορετικά σε μεταβολές πίεσης και θερμοκρασίας. Επιπλέον, μπορεί να γίνει μοντελοποίηση για διαφορετικές συνθήκες εισόδου, για διαφορετικά κλάσματα μάζας αλλά και για ένα ευρύ πεδίο πιέσεων. Ακόμα, μπορούν να εξεταστούν περιπτώσεις για μη ισοθερμοκρασιακές συμπιέσεις, εν αντιθέσει με το παραπάνω μοντέλο. Τέλος, μια άλλη παράμετρος που μπορεί να μελετηθεί επιπλέον είναι η διαφορά θερμοκρασίας που επικρατεί στους εναλλάκτες. Συγκεκριμένα, μπορεί να γίνει μοντελοποίηση για πολλές διαφορετικές διαφορές θερμοκρασιών, ή ακόμα να επικρατεί διαφορετική διαφορά θερμοκρασιών σε κάθε εναλλάκτη.
## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Balshaw, N. H., (2014). "*Practical Cryogenics: low temperature environments*". Oxford Instruments.

Black, W. Z., Hartley. J. G. (2008). "Thermodynamics, SI Version". Pearson Education Inc.

Lebrun, P., (2007). "An Introduction to Cryogenics". Cern, Accelerator Technology Department, Geneva.

Mukhopadhyay, M., (2010). "Fundamentals of Cryogenic Engineering". PHI Learning Private limited, New Delhi.

Perinic, G., Vandoni, G., Niinikovski, T., (2005). "*Introduction to Cryogenic Engineering*". Cern.

Serio, L. (2010). "Cryogenic Handbook". Iter Cryogenics.

Timmerhaus, K. D. "Cryogenic Process Engineering". University of Colorado.

Van Loan, C. F., Daisy Fan, K. Y., (2010). "Insight Through Computing. A MATLAB Introduction to Computational Science and Engineering". Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia.

Ventura, G., Risegari, L., (2008). "The Art of Cryogenics: Low-Temperature Experimental Techniques". Elsevier, Oxford.

Κολοβός, Κ. Γ. (2014). "*Κινητήρες πυραύλων και προωθητικά πυραυλικών συστημάτων".* Αθηνά, Ελληνικό Κέντρο Ελέγχου Όπλων.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] Atrey, M. D., (1998). "Thermodynamic analysis of Collins helium liquefaction cycle". *Elsevier*.

[2] Chang, H. M., Lim, H. S., Choe, K. H., (2014). "*Thermodynamic design of natural gas liquefaction cycles for offshore application*". Elsevier.

[3] Ganji, D. D., Gorji, M., Hatami, M., Hasanpour, A., Khademzadeh, N., (2013). "*Propulsion and Launching analysis of variable-mass rockets by analytical methods*". Elsevier.

[4] Hall, K. R., Iglesias-Silva, G. A., (1993). "Quadratic mixing rules for equations of state. Origins and relationships to the virial expansion". Elsevier.

[5] Nandi, T. K., Sarangi, S., (1992). "*Performance and Optimization of Hydrogen Liquefaction Cycles*". International Journal of Hydrogen Energy.

[6] Robinson, D. B., Peng, D. Y., Chung, S. Y. K., (1985). "The development of the Peng-Robinson equation and its application to phase equilibrium in a system containing methanol". Elsevier.