



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ - ΤΟΜΕΑΣ II
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ
ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

Εργασία Μαθήματος «Σχεδιασμός Διεργασιών»

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΥΡΗΝΟΞΥΛΟΥ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΓΛΥΚΕΡΟΛΗΣ ΚΑΙ ΚΥΚΛΟΠΕΝΤΑΝΟΝΗΣ - ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ

Συγγραφείς:

Βιδιάνος Γιαννίτης
Αριστοτέλης Αργυρόπουλος
Διονύσης Γιαννάτος
Θεωφανώ Αντωνία Πόταρη
Στυλιανή Σταύρου
Έλλη Πούτα

Αριθμοί Μητρώου:

ch19113
ch19114
ch19074
ch19555
ch19606
ch19534

Αθήνα, 2022

Περιεχόμενα

1	Υπενθύμιση της διεργασίας	2
2	Αναγνώριση των blocks και των ρευμάτων σε αυτά	2
2.1	Block 100 - Κλασμάτωση της βιομάζας	2
2.2	Block 200 - Παραγωγή Γλυκόζης	4
2.3	Block 300 - Λέβητας Καύσης Λιγνίνης	5
2.4	Block 400 - Παραγωγή Γλυκερόλης	5
2.5	Block 500 - Καθαρισμός Γλυκερόλης	6
2.6	Block 600 - Παραγωγή Κυκλοπεντανόνης με την Φουρφουράλη ως Ενδιάμεσο	7
2.7	Block 700 - Καθαρισμός της Κυκλοπεντανόνης	8
3	Συνολική εικόνα των ρευμάτων	9
4	Ενεργειακή ολοκλήρωση μονάδας	11
4.1	Υπολογισμός λανθάνουσων θερμότητων και προσθήκη τους στον παραπάνω πίνακα	11
4.2	Δημιουργία του αρχικού ΜΣΓ	13
4.3	Σχόλια για την ολοκλήρωση διάφορων κομματιών	16
4.3.1	Αντιδραστήρας παραγωγής γλυκερόλης	16
4.3.2	Αποστακτική στήλη γλυκερόλης	16
4.3.3	Αντιδραστήρας παραγωγής φουρφουράλης	16
4.3.4	Αντιδραστήρας παραγωγής κυκλοπεντανόνης	16
4.3.5	Αποστακτική στήλη κυκλοπεντανόνης	16
4.3.6	Αντιδραστήρας σακχαροποίησης	17
4.3.7	Αλλαγές στο ΜΣΓ	17
4.4	Περαιτέρω εκμετάλλευση της περιοχής κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης	17
4.5	Συμπεράσματα της ενεργειακής ολοκλήρωσης	21
5	Σχεδιασμός δικτύου εναλλαγής θερμότητας	21
5.1	Υπολογισμός Ενθαλπών	23
5.2	Δίκτυο εναλλαγής θερμότητας πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης	24
5.3	Δίκτυο εναλλαγής θερμότητας κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης	25
5.3.1	Επεξήγηση του συστήματος που θεωρήθηκε	26
6	Blocks της διεργασίας μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση	27
7	Κοστολόγηση της διεργασίας	30

1 Υπενθύμιση της διεργασίας

Η διεργασία που έχουμε μελετήσει είναι η αξιοποίηση του πυρηνόξυλου, δηλαδή του ξυλώδους υπολείμματος της επεξεργασίας των αποβλήτων ελαιοτριβείου και η παραγωγή χρήσιμων χημικών όπως η γλυκερόλη και η κυκλοπεντανόνη.

Το πυρηνόξυλο αρχικά πρέπει να κλασματοποιηθεί το οποίο γίνεται με έκρηξη ατμού και έπειτα αλκαλική εκχύλιση και bleaching της λιγνίνης. Το κυτταρινικό κλάσμα υδρολύεται προς γλυκόζη και έπειτα χρησιμοποιείται σε μία καθαρή καλλιέργεια του μικροοργανισμού *Candida glycerinogenes* για παραγωγή γλυκερόλης η οποία ανακτάται με ένα flash (για απομάκρυνση του νερού) και έπειτα μία απόσταξη (για περαιτέρω καθαρισμό της γλυκερόλης).

Το ημικυτταρινικό κλάσμα αυτουδρολύεται κατά την έκρηξη ατμού από τις έντονες συνθήκες και πηγαίνει για παραγωγή κυκλοπεντανόνης. Ως πλατφόρμα για την παραγωγή αυτή, χρησιμοποιείται η φουρφουράλη, ένα προϊόν αφυδάτωσης της ξυλόζης σε υψηλή θερμοκρασία. Η καταλυτική υδρογόνωση της φουρφουράλης σε υψηλή πίεση παράγει την επιθυμητή κυκλοπεντανόνη. Βέβαια, το μίγμα νερό-κυκλοπεντανόνη είναι ένα δύσκολο μίγμα στον διαχωρισμό λόγω της δημιουργίας αζεοτρόπου, συν ότι υπάρχει και περίσσεια φουρφουράλης στον αντιδραστήρα η οποία δημιουργεί και αυτή αζεότροπο. Αν η απόσταξη γίνει σε υψηλή πίεση (πχ στα 40 bar που είναι ήδη το ρεύμα) δεν υπάρχει το πρόβλημα αυτό, όμως η απόσταξη είναι πολύ δύσκολη, λόγω της υψηλής πίεσης και τίθενται και θέματα ασφάλειας. Για αυτό, προτείνεται η ψύξη του ρεύματος μέχρι θερμοκρασία περιβάλλοντος (μαζί με εκτόνωση σε ατμοσφαιρική πίεση), εκχύλιση της κυκλοπεντανόνης από το νερό με τολουόλιο και έπειτα απόσταξη του μίγματος η οποία είναι αρκετά εύκολη καθώς το τολουόλιο είναι αρκετά πτητικό.

Τέλος, η λιγνίνη της διεργασίας καίγεται και χρησιμοποιείται σε κύκλο συμπαραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας.

Καθώς η διεργασία αυτή είναι πολύ μεγάλη, παρακάτω έχει ακολουθηθεί μία θεώρηση με blocks τα οποία χωρίζουν σε κομμάτια την διεργασία ώστε να είναι πιο κατανοητή.

2 Αναγνώριση των blocks και των ρευμάτων σε αυτά

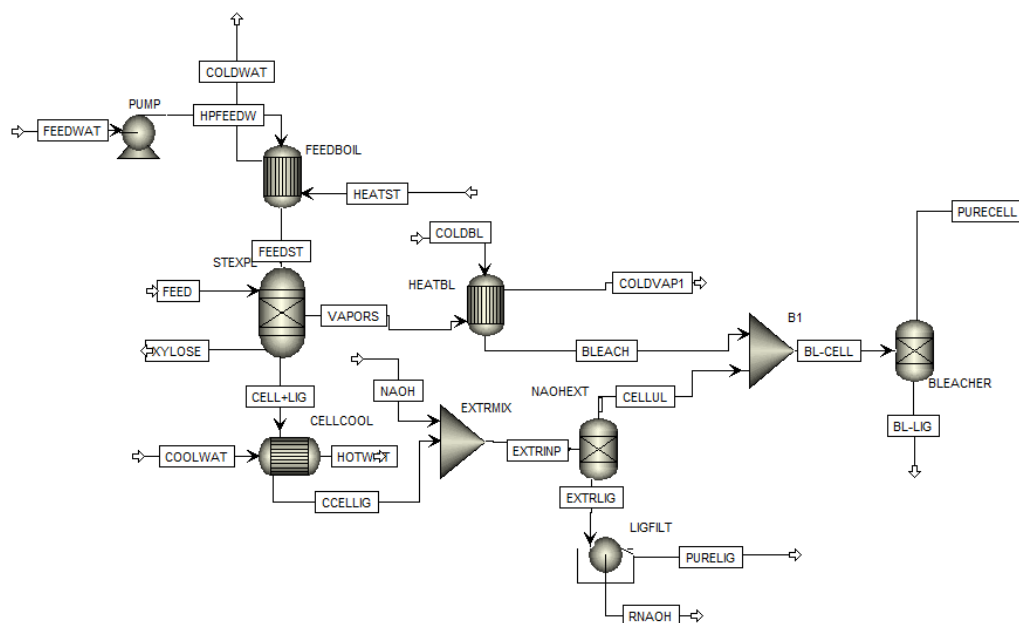
Για την καλύτερη κατανόηση της διεργασίας, θα αναλυθεί ξεχωριστά κάθε block, οι διεργασίες σε αυτό και τα θερμά και ψυχρά του ρεύματα. Αξίζει να αναφερθεί πως οι φωτογραφίες του κάθε block στο Aspen οι οποίες παρατίθενται είναι πριν την συνολική ενεργειακή ολοκλήρωση της μονάδας και άρα οι περισσότερες εκ αυτών δεν είναι πλέον έγκυρες. Οι τελικές μορφές τους θα αναφερθούν κατά τον σχεδιασμό του τελικού δικτύου εναλλαγής θερμότητας.

2.1 Block 100 - Κλασμάτωση της βιομάζας

Το block αυτό είναι για την βασική διεργασία διαχωρισμού την έκρηξη ατμού και της επακόλουθες διεργασίες διαχωρισμού κυτταρίνης-λιγνίνης. Ως τροφοδοσία έχει νερό για παραγωγή ατμού, πυρηνόξυλο (πρώτη ύλη) και τα υδατικά διαλύματα που απαιτούνται για τις διεργασίες διαχωρισμού. Προϊόντα είναι τα τρία βασικά ρεύματα ξυλόζης, κυτταρίνης και λιγνίνης.

Στο block αυτό, έχουμε τα εξής.

- Ατμός της τροφοδοσίας ο οποίος θερμαίνεται από θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι 232 °C (ψυχρό ρεύμα). Το ρεύμα με το οποίο εναλλάσσει θερμότητα είναι βοηθητική παροχή της διεργασίας. Κάποια από την θερμότητα του προσφέρεται για την θέρμανση και διάσπαση του πυρηνόξυλου, ενώ ο υπόλοιπος ατμός, μαζί με τα υπόλοιπα ατμώδη υπολείμματα της έκρηξης (κυρίως CO₂) διατίθενται ως ένα θερμό ρεύμα της διεργασίας. Βέβαια, αν παρατηρηθεί πως υπάρχει περίσσεια θερμικής ενέργειας, μπορεί αυτό το ρεύμα να μην χρησιμοποιηθεί.



Σχήμα 1: Block 100 στο Aspen

- Κυτταρίνη και Λιγνίνη που βγαίνουν από το steam explosion στους 232 και πρέπει να ψυχθούν μέχρι την θερμοκρασία λειτουργίας της αλκαλικής εκχύλισης ($80\text{ }^{\circ}\text{C}$). Μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το υπάρχον θερμικό περιεχόμενο τους για να θερμάσουμε και το διάλυμα καυστικού νατρίου όμως. Η θερμοκρασία βγαίνει $80.65\text{ }^{\circ}\text{C}$ αν ο εναλλάκτης το ψύξει μέχρι τους $105\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Η ξυλόζη οδηγείται στην διεργασία παραγωγής κυκλοπεντανόνης, για αυτό για το block αυτό δεν μεταβάλλεται η θερμότητα της.
- Θέρμανση του διαλύματος χλωρίνης (bleach) καθώς για την πλήρη απολιγνοποίηση θέλουμε εφαρμογή του διαλύματος αυτού στους $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ψυχρό ρεύμα). Στο παρόν διάγραμμα ροής γίνεται εν μέρει με την θερμότητα των ατμών της έκρηξης ατμού και μετά με την ανάμιξη με το ρεύμα κυτταρίνης για τελική θερμοκρασία $69.9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Στην ανάμιξη αυτή έχουμε και μείωση της θερμότητας του ρεύματος κυτταρίνης κατά $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ περίπου.
Άρα μπορούμε να κάνουμε τον εξής πίνακα για τα εκμεταλλεύσιμα θερμά και ψυχρά ρεύματα

Πίνακας 1: Θερμά και Ψυχρά Ρεύματα στο Block 100

Ρεύμα	Είδος	T_{in} (C)	T_{out} (C)	Παροχή (kmol/hr)	Σύσταση
FeedSteam	Ψυχρό	20	232	633.22	Νερό
Vapors	Θερμό	232	30	905.27	Νερό 0.92 CO ₂ 0.08
CellLig	Θερμό	232	80.65	84.76	Κυτταρίνη 0.5 Λιγνίνη 0.5
NaOH	Ψυχρό	20	80.65	80.37	Νερό
Bleach	Ψυχρό	20	69.9	55.62	Νερό 99.5

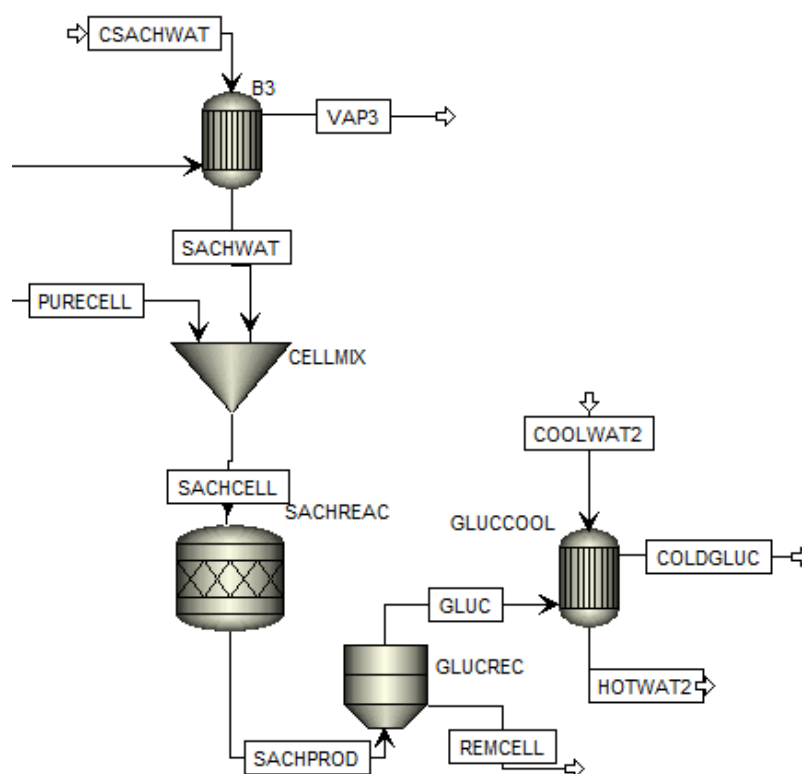
Continued on next page

Continued from previous page

Ρεύμα	Είδος	T _{in} (C)	T _{out} (C)	Παροχή (kmol/hr)	Σύσταση
					Χλωρίνη 0.05
Cellulose	Θέρμο	80.65	69.9	54.32	Κυτταρίνη 0.78 Λιγνίνη 0.22

2.2 Block 200 - Παραγωγή Γλυκόζης

Σκοπός του block αυτού είναι η υδρόλυση της κυτταρίνης και παραγωγή καθαρής γλυκόζης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως θρεπτικό μέσο στην καλλιέργεια του *C. glycerinogenes*. Στο block αυτό θεωρείται ως τροφοδοσία η καθαρή κυτταρίνη του block 100 και νερό το οποίο απαιτείται για την υδρόλυση της κυτταρίνης. Προϊόν της διεργασίας είναι η γλυκόζη που θα τροφοδοτηθεί στον βιοαντιδραστήρα παραγωγής γλυκερόλης (block 400).



Σχήμα 2: Block 200 στο Aspen

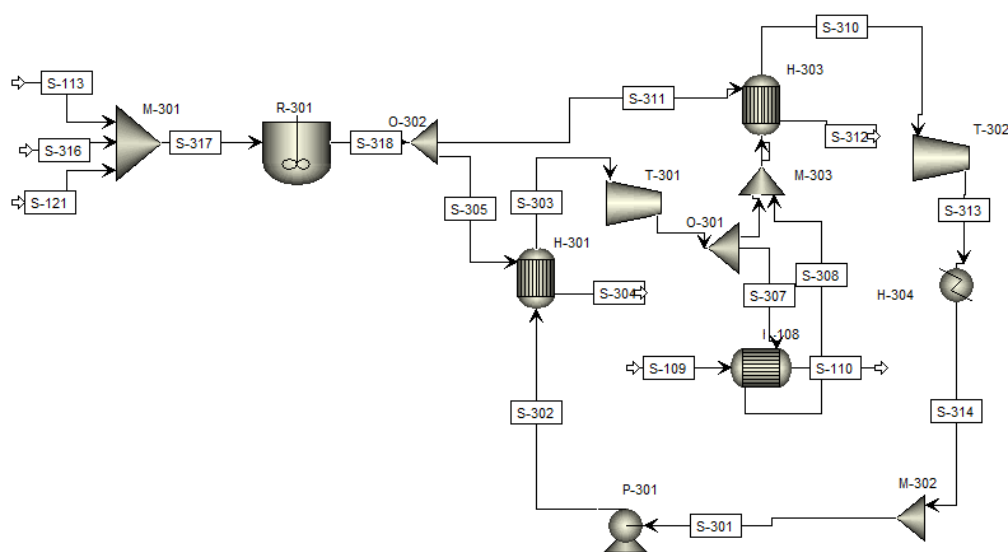
Στο block αυτό:

- Θέλουμε η κυτταρίνη και το νερό να τροφοδοτηθούν στους $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ για την υδρόλυση. Για αυτό, το νερό πρώτα θερμαίνεται μέχρι μία θερμοκρασία και μετά αναμιγνύεται με την κυτταρίνη για τελική θερμοκρασία $49.75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Το νερό ξεκινάει από θερμοκρασία περιβάλλοντος και θερμαίνεται (επειδή η θερμοκρασία θα πέσει πολύ αν αναμιχθούν ως έχει) ενώ η κυτταρίνη ψύχεται από τους $69.9\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Η γλυκόζη ψύχεται από τους $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ στους οποίους παράχθηκε μέχρι τους $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ η οποία είναι η βέλτιστη λειτουργία του αντιδραστήρα παραγωγής γλυκερόλης στο block 400. Άρα μπορούμε να κάνουμε τον εξής πίνακα για τα εκμεταλλεύσιμα θερμά και ψυχρά ρεύματα

Πίνακας 2: Θερμά και Ψυχρά Ρεύματα στο Block 200					
Ρεύμα	Είδος	T _{in} (C)	T _{out} (C)	Παροχή (kmol/hr)	Σύσταση
PureCell	Θερμό	61.97	49.75	42.55	Κυτταρίνη
SachWater	Ψυχρό	20	49.75	715	Νερό
Glucose	Θερμό	50	30	669.45	Νερό 0.97 Γλυκόζη 0.03

2.3 Block 300 - Λέβητας Καύσης Λιγνίνης

Το block αυτό έχει την προσομοίωση του λέβητα που χρησιμοποιείται για την καύση της λιγνίνης και του κύκλου συμπαραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Η λιγνίνη καίγεται και από τα καυσαέρια της παράγεται ατμός υψηλής πίεσης. Προϊόν του block 300 είναι ο ατμός υψηλής πίεσης που είναι αρκετά χρήσιμος για την εγκατάσταση. Αν χρησιμοποιηθεί όλη η λιγνίνη για παραγωγή ατμού ο οποίος θα διατεθεί ως θερμαντικό μέσο, μιλάμε για ένα θερμό ρεύμα με ενθαλπία 88.6 MW. Παρότι δεν έχουν αναφερθεί ακόμη οι ενεργειακές απαιτήσεις των διεργασιών, μία πρόχειρη προσέγγιση μας λέει πως όλες οι διεργασίες που έχουμε, χωρίς καμία ολοκλήρωση έχουν απαίτηση σε θερμή βοηθητική παροχή 23 MW. Άρα υπάρχει μία μεγάλη περίσσεια θερμικής ενέργειας, η οποία όταν υπάρχει σε μία εγκατάσταση χρησιμοποιείται για ηλεκτροπαραγωγή.



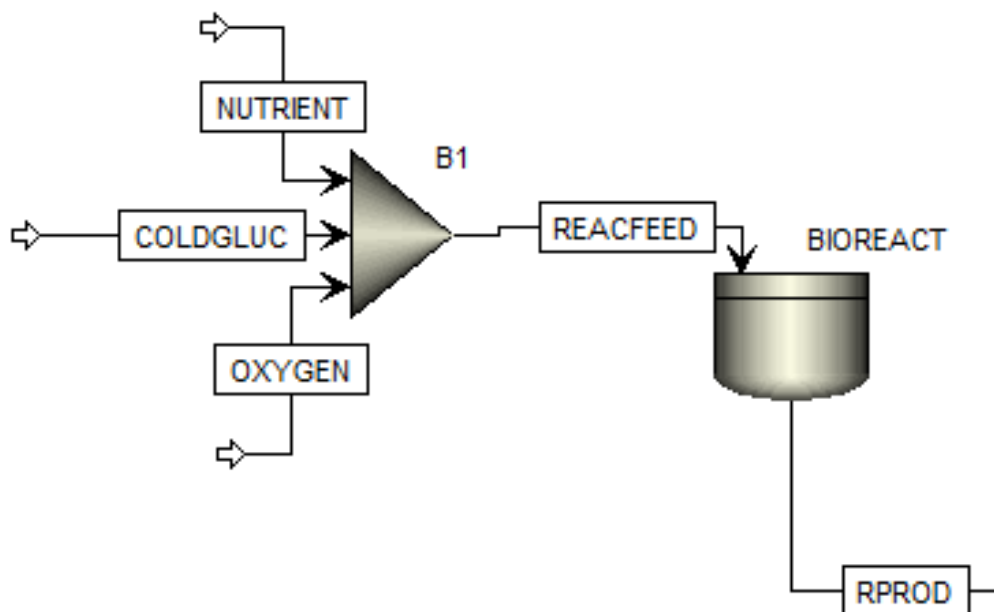
Σχήμα 3: Block 300 στο Aspen

Εφόσον αυτό το block χρησιμοποιεί ένα κύκλο Rankine για ηλεκτροπαραγωγή (λόγω της τεράστιας περίσσειας θερμικής ενέργειας που έχει), τα ρεύματα του δεν θα ληφθούν υπόψη στην ολοκλήρωση της διεργασίας, αλλά όπου χρειάζεται βοηθητική θερμή παροχή θα υποθέτουμε ότι είναι η παροχή S-307 του διαγράμματος αυτού, η οποία είναι ατμός στα 60 bar και 497.5 °C και η ποσότητά της θα είναι τέτοια ώστε να είναι αρκετή για όλα τα θερμά της διεργασίας.

2.4 Block 400 - Παραγωγή Γλυκερόλης

Στο block αυτό φαίνεται ο βιοαντιδραστήρας του μικροοργανισμού *C. glycerinogenes* ο οποίος χρησιμοποιείται για την παραγωγή γλυκερόλης. Ως τροφοδοσία χρησιμοποιείται ένα μίγμα

υδατικού διαλύματος γλυκόζης μαζί με ουρία (πηγή αζώτου) και επαρκές οξυγόνο για την αερόβια καλλιέργεια. Επίσης στο feed υπάρχει και μικρή ποσότητα βιομάζας για να ξεκινήσει η αντίδραση.



Σχήμα 4: Block 400 στο Aspen

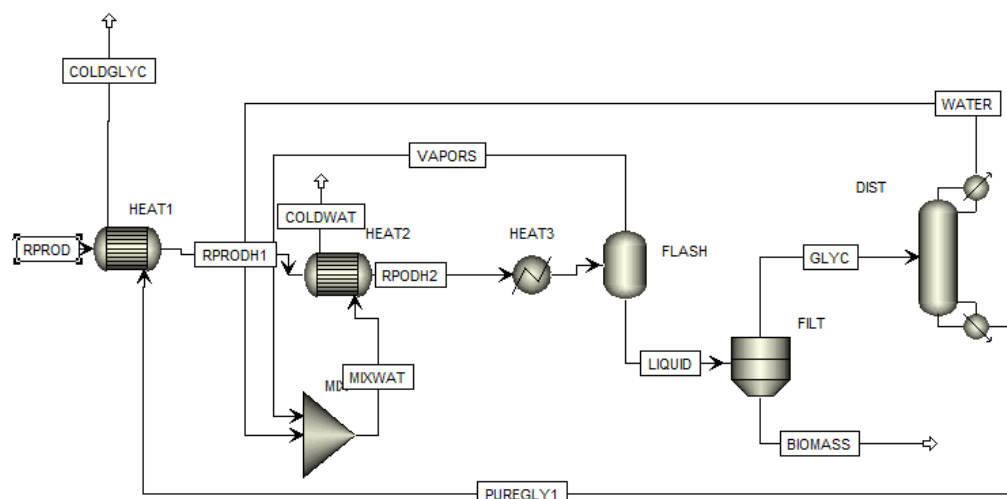
Στο block αυτό, όλα τα ρεύματα τροφοδοτούνται στους $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ και αντιδρούν σε αντιδραστήρα σταθερής θερμοκρασίας. Άρα, δεν υπάρχει καμία μεταβολή στην θερμοκρασία των ρευμάτων και άρα κανένα θερμό ή ψυχρό ρεύμα να χρησιμοποιηθεί.

2.5 Block 500 - Καθαρισμός Γλυκερόλης

Το block αυτό είναι για τον διαχωρισμό των προϊόντων του βιοαντιδραστήρα και την ανάκτηση της καθαρής εμπορεύσιμης γλυκερόλης. Τροφοδοσία του είναι το προϊόν του block 400, δηλαδή τα προϊόντα του βιοαντιδραστήρα μετά την πρώτη βαθμίδα θέρμανσης από την γλυκερόλη. Προϊόν της διεργασίας είναι η καθαρή γλυκερόλη και δύο υδατικά κλάσματα τα οποία χρησιμοποιούνται για την θέρμανση.

Στο block αυτό υπάρχουν:

- Θέρμανση του προϊόντος του βιοαντιδραστήρα μέχρι τους $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ για flash και έπειτα απόσταξη (ψυχρό ρεύμα).
- Παραγωγή 3 διαθέσιμων θερμών ρευμάτων, ένα την ατμώδη φάση του flash, ένα με σχεδόν καθαρό νερό από το απόσταγμα της αποστακτικής και ένα καθαρής γλυκερόλης. Ο χαρακτηρισμός των ρευμάτων αυτών είναι



Σχήμα 5: Block 500 στο Aspen

Ρεύμα	Είδος	T _{in} (C)	T _{out} (C)	Παροχή (kmol/hr)	Σύσταση
RProd	Ψυχρό	30	140	774.29	Νερό 0.89 CO ₂ 0.08 Γλυκερόλη 0.02 Άλλα 0.01
FlashVaps	Θερμό	140	30	745.99	Νερό 0.91 CO ₂ 0.089 Άλλα 0.01
GlycWater	Θερμό	144.4	30	9.82	Νερό
PureGlycerol	Θερμό	288.9	30	15.9	Γλυκερόλη

Αξίζει να αναφερθεί πως ο χαρακτηρισμός άλλα αναφέρεται σε περίσσεια αντιδρώντων (ουρία, οξυγόνο), την παραγόμενη βιομάζα και τα παραπροϊόντα της αντίδρασης (οξικό οξύ και αιθανόλη) τα οποία είναι σε αρκετά μικρές ποσότητες συγκριτικά με το νερό, το CO₂ και την γλυκερόλη. Στους υπολογισμούς της ενεργειακής ολοκλήρωσης θα αγνοηθούν.

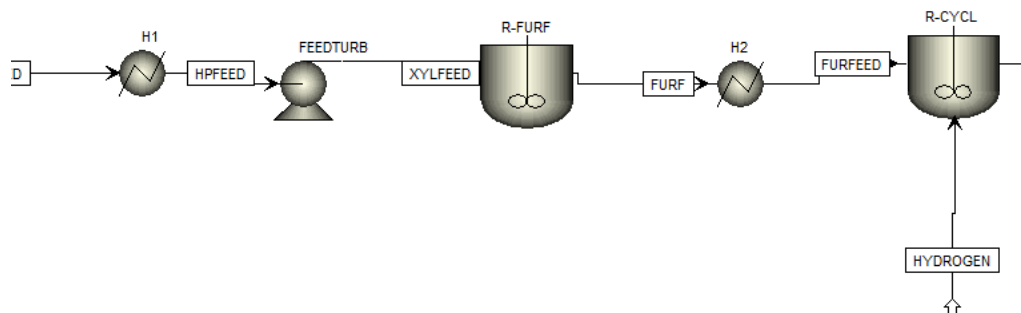
2.6 Block 600 - Παραγωγή Κυκλοπεντανόνης με την Φουρφουράλη ως Ενδιάμεσο

Το block αυτό είναι αυτό που αξιοποιεί την ημικυτταρινική φάση της βιομάζας όπως αυτή βγαίνει από το steam explosion στο block 100. Στο block αυτό παράγεται αρχικά ένα ενδιάμεσο προϊόν, η φουρφουράλη, από την αφυδάτωση της ξυλόζης ενώ αυτή οδηγείται σε έναν δεύτερο αντιδραστήρα, όπου με διεργασία καταλυτικής υδρογόνωσης, η φουρφουράλη μετατρέπεται σε κυκλοπεντανόνη, το τελικό μας προϊόν.

Στο block αυτό:

- Τροφοδοτείται αρχικά η ξυλόζη στους 232 °C όπως βγήκε από την έκρηξη ατμού και θερμαίνεται μέχρι τους 243 °C όπου λειτουργεί ο πρώτος αντιδραστήρας (ψυχρό ρεύμα)
- Ψύχεται το προϊόν της πρώτης αντίδρασης για να τροφοδοτηθεί στους 160 °C στον 2ο αντιδραστήρα (θερμό ρεύμα).

Άρα τα διαθέσιμα ρεύματα είναι



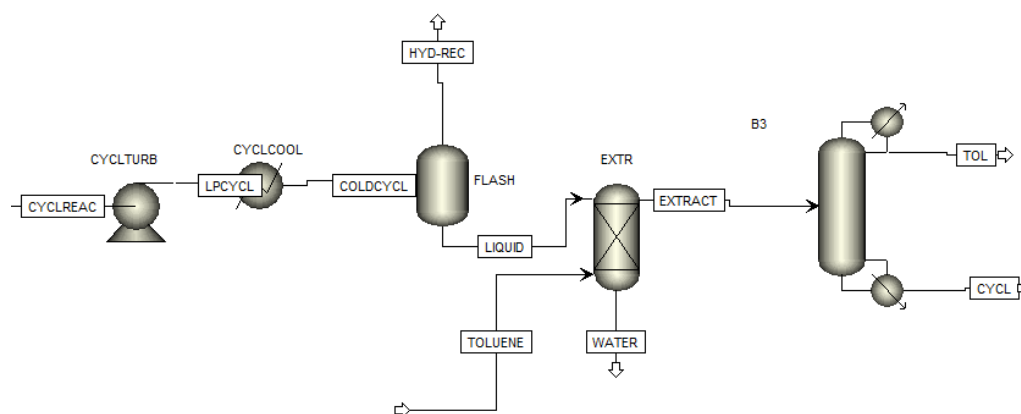
Σχήμα 6: Block 600 στο Aspen

Πίνακας 3: Θερμά και Ψυχρά Ρεύματα στο Block 600

Ρεύμα	Είδος	T _{in} (C)	T _{out} (C)	Παροχή (kmol/hr)	Σύσταση
XylFeed	Ψυχρό	232	243	26.38	Ξυλόζη
FurFeed	Θερό	243	160	105.52	Νερό 0.75 Φουρφουράλη 0.25

2.7 Block 700 - Καθαρισμός της Κυκλοπεντανόνης

Το block αυτό έχει ως σκοπό τον καθαρισμό του προϊόντος του block 600, δηλαδή του προϊόντος του αντιδραστήρα της κυκλοπεντανόνης. Αυτό είναι μίγμα νερού-κυκλοπεντανόνης με μικρή περίσσεια φουρφουράλης και υδρογόνου από την αντίδραση. Προϊόν της διεργασίας αυτής είναι η εμπορεύσιμη πλέον κυκλοπεντανόνη υψηλής καθαρότητας. Όπως προαναφέρθηκε, αυτό είναι δύσκολο να γίνει με απόσταξη λόγω αζεοτρόπων για αυτό γίνεται με εκχύλιση.



Σχήμα 7: Block 700 στο Aspen

Αρχικά το προϊόν έρχεται σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος. Έπειτα, περνάει ένα flash για να φύγει το αέριο υδρογόνο, μία εκχύλιση για να φύγει το νερό και τέλος μία απόσταξη για να διαχωριστεί η κυκλοπεντανόνη από τον διαλύτη (τολουόλιο). Το υδρογόνο και το νερό που απομακρύνονται είναι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος άρα η θερμική τους εκμετάλλευση δεν έχει ιδιαίτερο νόημα.

Πίνακας 4: Θερμά και Ψυχρά Ρεύματα στο Block 700

Ρεύμα	Είδος	T _{in} (C)	T _{out} (C)	Παροχή (kmol/hr)	Σύσταση
CyclReac	Θερμό	160	30	2132.66	Κυκλοπεντανόνη 0.2 Νερό 0.79 Υδρογόνο 0.01
Cycl	Θερμό	130	30	26	Κυκλοπεντανόνη 0.98 Φουρφουράλη 0.015 Τολουόλιο 0.005
Tol	Θερμό	50	30	51.02	Τολουόλιο 0.98 Νερό 0.01 Κυκλοπεντανόνη 0.01

3 Συνολική εικόνα των ρευμάτων

Έχοντας δει κάθε block της διεργασίας ξεχωριστά, μπορούμε πλέον να φτιάξουμε τον συνολικό πίνακα θερμών και ψυχρών ρευμάτων ο οποίος είναι και αυτός που θα χρησιμοποιηθεί για την ενεργειακή ολοκλήρωση παρακάτω.

Πίνακας 5: Συνολικός Πίνακας Θερμών και Ψυχρών της διεργασίας

Ρεύμα	Είδος	T _{in} (C)	T _{out} (C)	Παροχή (kmol/hr)	Σύσταση
FeedSteam	Ψυχρό	20	232	633.22	Νερό
Vapors	Θερμό	232	30	905.27	Νερό 0.92 CO ₂ 0.08
CellLig	Θερμό	232	80.65	84.76	Κυτταρίνη 0.5 Λιγνίνη 0.5
NaOH	Ψυχρό	20	80.65	80.37	Νερό
Bleach	Ψυχρό	20	69.9	55.62	Νερό 99.5 Χλωρίνη 0.05
Cellulose	Θέρμο	80.65	69.9	54.32	Κυτταρίνη 0.78 Λιγνίνη 0.22
PureCell	Θερμό	61.97	49.75	42.55	Κυτταρίνη
SachWater	Ψυχρό	20	49.75	715	Νερό
Glucose	Θερμό	50	30	669.45	Νερό 0.97 Γλυκόζη 0.03
RProd	Ψυχρό	30	140	774.29	Νερό 0.89 CO ₂ 0.08 Γλυκερόλη 0.02 Άλλα 0.01
FlashVaps	Θερμό	140	30	745.99	Νερό 0.91 CO ₂ 0.089 Άλλα 0.01
GlycWater	Θερμό	144.4	30	9.82	Νερό
PureGlycerol	Θερμό	288.9	30	15.9	Γλυκερόλη
XylFeed	Ψυχρό	232	243	26.38	Ξυλόζη
FurFeed	Θερμό	243	160	105.52	Νερό 0.75

Continued on next page

Continued from previous page

Ρεύμα	Είδος	T _{in} (C)	T _{out} (C)	Παροχή (kmol/hr)	Σύσταση
					Φουρφουράλη 0.25
CyclReac	Θερμό	160	30	2132.66	Κυκλοπεντανόνη 0.2 Νερό 0.79 Υδρογόνο 0.01
Cycl	Θερμό	130	30	26	Κυκλοπεντανόνη 0.98 Φουρφουράλη 0.015 Τολουόλιο 0.005
Tol	Θερμό	50	30	51.02	Τολουόλιο 0.98 Νερό 0.01 Κυκλοπεντανόνη 0.01

Για να προετοιμάσουμε τα ρεύματα για την ολοκλήρωση όμως πρέπει αρχικά να υπολογιστεί η θερμοχωρητικότητα του κάθε ρεύματος, διαδικασία που φαίνεται παρακάτω.

Πίνακας 6: Θερμοχωρητικότητες ουσιών

Ουσία	C _p (J/mol K)
Νερό	75.38
Κυτταρίνη	89.63
Λιγνίνη	90.98
Γλυκόζη	225
Γλυκερόλη	225.4
CO ₂	37.35
Ξυλόζη	178.1
Φουρφουράλη	159.5
Κυκλοπεντανόνη	112.18
Υδρογόνο	14.5
Τολουόλιο	158.4

και από αυτά υπολογίζονται οι ειδικές θερμοχωρητικότητες και οι θερμοχωρητικότητες των ρευμάτων

Πίνακας 7: Θερμοχωρητικότητες ρευμάτων

Ρεύμα	Παροχή (kmol/h)	C _p (J/mol K)	CP (MJ/h K)
FeedSteam	633.22	75.38	47.732124
StExpVapors	905.27	72.34	65.487232
CellLig	84.76	90.31	7.6546756
NaOH	80.37	75.38	6.0582906
Bleach	55.62	75.38	4.1926356
Cellulose	54.32	89.93	4.8849976
PureCell	42.55	89.63	3.8137565
SachWater	715	75.38	53.8967
Glucose	669.45	79.87	53.468972
RProd	774.29	74.58	57.746548
FlashVapors	745.99	71.96	53.681440
GlycWater	9.82	75.38	0.7402316

Continued on next page

Continued from previous page

Ρεύμα	Παροχή (kmol/h)	Cp (J/mol K)	CP (MJ/h K)
PureGlyc	15.9	225.4	3.58386
XylFeed	26.38	178.1	4.698278
FurFeed	105.52	96.41	10.173183
CyclReac	24.61	112.71	2.7737931
CyclWater	106.9	76.12	8.137228

Επίσης χρήσιμος για την ενεργειακή ολοκλήρωση είναι ο πίνακας των ανηγμένων θερμοκρασιών:

Πίνακας 8: Πίνακας ανηγμένων θερμοκρασιών

Ρεύμα	Είδος	T _{in} (C)	T _{out} (C)
FeedSteam	Ψυχρό	25	237
StExpVapors	Θερμό	227	25
CellLig	Θερμό	227	75.65
NaOH	Ψυχρό	25	85.65
Bleach	Ψυχρό	25	74.9
Cellulose	Θερμό	75.65	64.9
PureCell	Θερμό	56.97	44.75
SachWater	Ψυχρό	25	54.75
Glucose	Θερμό	45	25
RProd	Ψυχρό	35	145
FlashVaps	Θερμό	135	25
GlycWater	Θερμό	139.4	25
PureGlycerol	Θερμό	283.9	25
XylFeed	Ψυχρό	237	248
FurFeed	Θερμό	238	155
Cyclo	Θερμό	262.8	25
CyclWater	Θερμό	196.5	25

4 Ενεργειακή ολοκλήρωση μονάδας

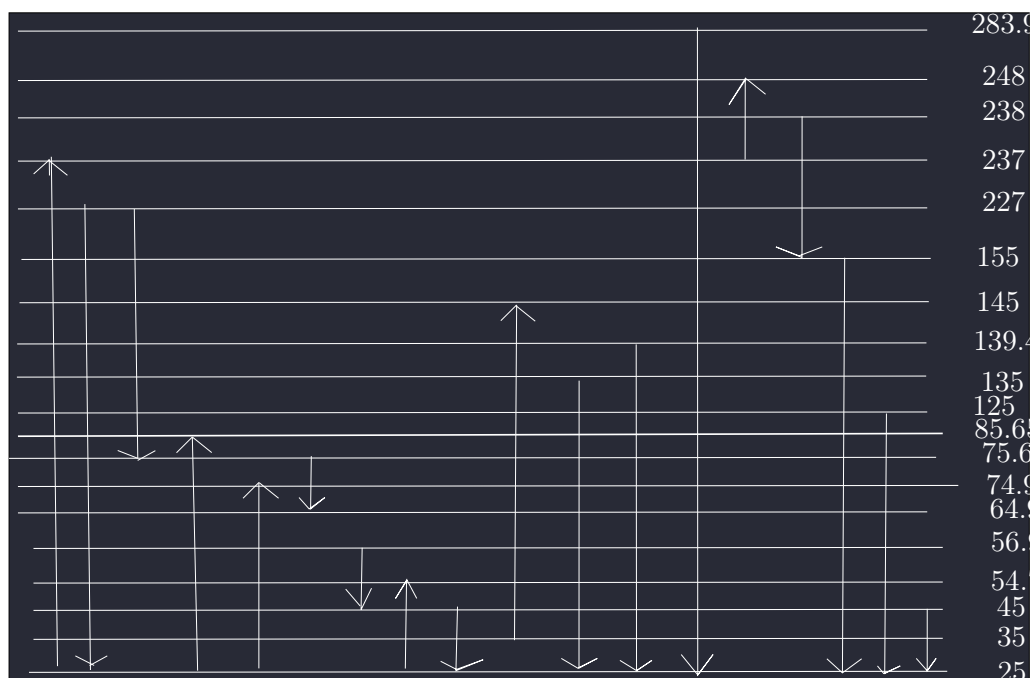
Με βάση τους δύο παραπάνω πίνακες, μπορεί να γίνει η συνολική ενεργειακή ολοκλήρωση της μονάδας. Πρώτο βήμα είναι να αναγνωρίσουμε τα θερμά και ψυχρά ρεύματα της διεργασίας, το οποίο έγινε ενώ το δεύτερο είναι να προχωρήσουμε από θερμά και ψυχρά ρεύματα στον ενεργειακό καταρράκτη της διεργασίας και στα συνδυασμένα "ψεύδο"-ρεύματα για κάθε θερμοκρασιακή περιοχή του. Αυτά φαίνονται παρακάτω.

Βέβαια, στον υπολογισμό αυτόν, έχουν συμπεριληφθεί μόνο οι αισθητές θερμότητες των ρευμάτων. Για αυτό, πρέπει να γίνει και ο αντίστοιχος υπολογισμός λανθάνουσων θερμοτήτων καθώς υπάρχουν και είναι πολύ σημαντικές.

4.1 Υπολογισμός λανθάνουσων θερμότητων και προσθήκη τους στον παραπάνω πίνακα

Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης έχουν τα ρεύματα FeedSteam, RProd ενώ λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης έχουν τα StExpVapors, FlashVaps, GlycWater.

Η θερμότητα εξάτμισης του FeedSteam είναι 21829.6 MJ/hr ενώ του RProd 28921 MJ/hr. Η θερμότητα συμπύκνωσης του StExpVapors είναι 21442 MJ/hr, του FlashVaps



Σχήμα 8: Ενεργειακός καταρράκτης της διεργασίας

Πίνακας 9: Χαρακτηρισμός των "ψευδο"-ρευμάτων του ενεργειακού καταρράκτη

T_1	T_2	ΔT	CPc	CPh	CP	ΔH
283.9	248	35.9	0	3.584	-3.584	-128.6656
248	238	10	4.698	3.584	1.114	11.14
238	237	1	4.698	13.757	-9.059	-9.059
237	230.01	6.99	47.732	13.757	33.975	237.48525
230	227	3	47.732	13.757	33.975	101.925
227	155	72	47.732	83.315	-35.583	-2561.976
155	145	10	47.732	91.792	-44.06	-440.6
145	139.4	5.6	105.479	91.792	13.687	76.6472
139.4	135	4.4	105.479	92.532	12.947	56.9668
135	125	10	105.479	161.279	-55.8	-558.
125	97.01	27.99	105.479	150.889	-45.41	-1271.0259
97	85.65	11.35	105.479	150.889	-45.41	-515.4035
85.65	75.65	10.	111.537	150.889	-39.352	-393.52
75.65	74.9	0.75	111.537	148.119	-36.582	-27.4365
74.9	64.9	10.	115.730	148.119	-32.389	-323.89
64.9	56.97	7.93	115.730	143.233	-27.503	-218.09879
56.97	54.75	2.22	115.730	147.048	-31.318	-69.52596
54.75	45	9.75	169.627	147.048	22.579	220.14525
45	35	10	169.627	208.023	-38.396	-383.96
35	25	10	111.880	208.023	-96.143	-961.43

29099 MJ/hr και του GlycWater 418.51 MJ/hr

Το FeedSteam εξατμίζεται στους 225 (μπάνει στο ΜΣΓ ως 230) ενώ το GlycWater συμπηκνώνεται στους 102 (97 στο ΜΣΓ). Τα άλλα 3 είναι πιο περίπλοκα καθώς δεν αποτελούν καθαρό νερό άρα η λανθάνουσα θερμότητα απορροφάται/εκπέμπεται σε ένα θερμοκρασιακό εύρος.

Για τους ατμούς από το Steam Explosion, το νερό έχει υγροποιηθεί πλήρως στους 130 °C (ή ανηγμένη θερμοκρασία 125 °C) και θα κάνουμε την παραδοχή πως η λανθάνουσα θερμότητα του εκπέμπεται με σταθερό ρυθμό για 102 °C, άρα ο ρυθμός αυτός θα είναι $217.12 \frac{MJ}{hr \cdot ^\circ C}$. Για το FlashVaps, η θερμοκρασία αυτή είναι 28 °C άρα θα θεωρήσουμε πως σε όλο το εύρος εκπέμπεται λανθάνουσα θερμότητα με ρυθμό $194.92 \frac{MJ}{hr \cdot ^\circ C}$. Τέλος, για το RProd, δεν εξατμίζεται όλο το ρεύμα (υψηλό σημείο φυσαλίδας λόγω ύπαρξης της γλυκερόλης) άρα λανθάνουσα θερμότητα νερού και γλυκερόλης απορροφάται σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος με ρυθμό $262.92 \frac{MJ}{hr \cdot ^\circ C}$. Στην περιοχή από τους 135 °C μέχρι τους 35 °C έχουμε τις λανθάνουσες θερμότητες και των ατμών του Flash και του RProd. Άρα, η λανθάνουσα θερμότητα που θα προσθέσουμε θα είναι $262.92 - 194.92 = 68 \frac{MJ}{hr \cdot ^\circ C}$.

Άρα ο παραπάνω πίνακας μεταβάλλεται ως εξής

Πίνακας 10: Υπολογισμός των "ψεύδο"-ρευμάτων με τις λανθάνουσες θερμότητες

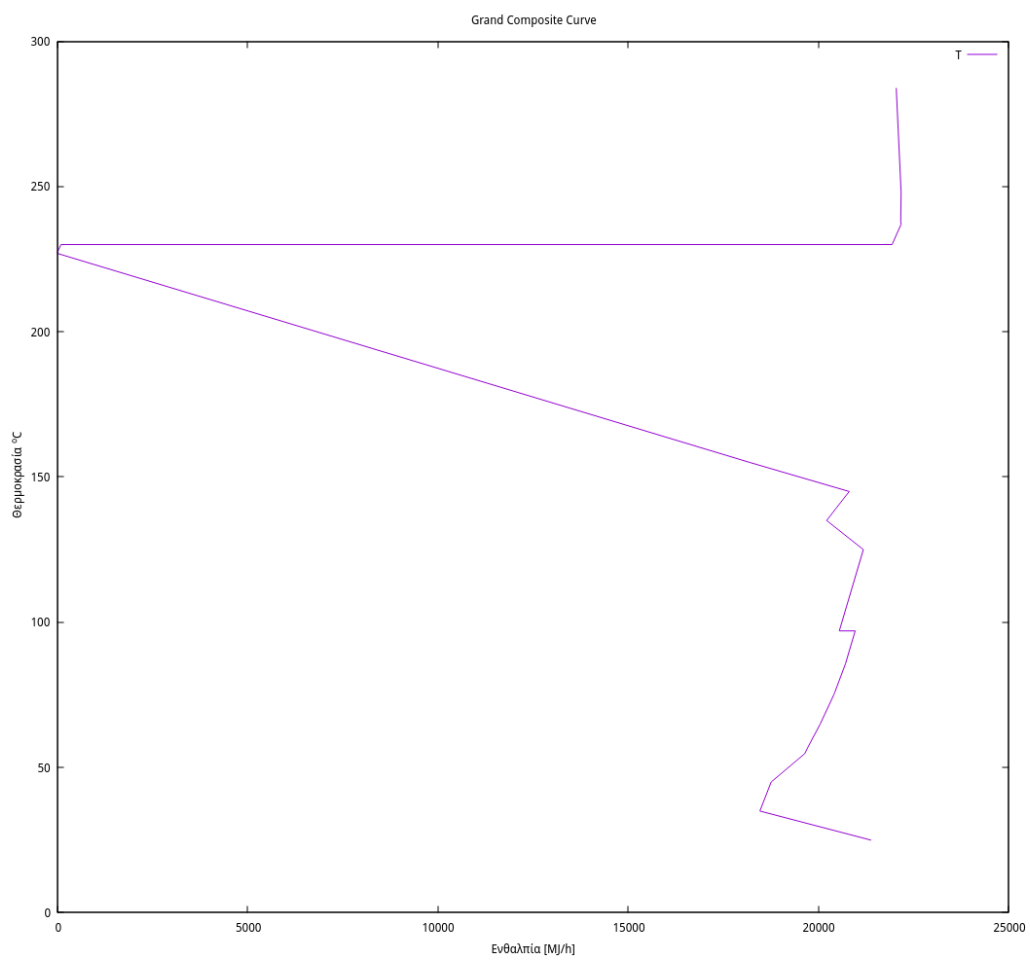
T ₁	T ₂	ΔT	ΔH
283.9	248	35.9	-128.6656
248	238	10	11.14
238	237	1	-9.059
237	230.01	6.99	237.48525
230.01	230	0.01	21829.6
230	227	3	101.925
227	155	72	-18195
155	145	10	-2611.8
145	139.4	5.6	333.15
139.4	135	4.4	258.49
135	125	10	-963.6
125	97.01	27.99	632.29
97.01	97	0.01	-417.83
97	85.65	11.35	256.4
85.65	75.65	10.	286.48
75.65	74.9	0.75	23.563
74.9	64.9	10.	356.11
64.9	56.97	7.93	321.14
56.97	54.75	2.22	81.434
54.75	45	9.75	883.14
45	35	10	296.04
35	25	10	-2910.6

4.2 Δημιουργία του αρχικού ΜΣΓ

Από τον παρακάτω πίνακα, αν dH ο πίνακας των ενθαλπιών, μπορεί να υπολογιστεί η ενεργειακή στάθμη για το μεγάλο σύνθετο γράφημα από τον κώδικα `cumdH = -min(cumsum(-dH)) + cumsum(-dH)` από τα οποία προκύπτουν ο πίνακας αθροιστικής ενθαλπίας με την θερμοκρασία και το αντίστοιχο ΜΣΓ.

Πίνακας 11: Δεδομένα για τον ενεργειακό καταρράκτη

Cumulative Dh	T
22042.425	283.9
22171.091	248
22159.951	238
22169.010	237
21931.525	230.01
101.925	230
0	227
18195	155
20806.8	145
20473.65	139.4
20215.16	135
21178.76	125
20546.47	97.01
20964.3	97
20707.9	85.65
20421.42	75.65
20397.857	74.9
20041.747	64.9
19720.607	56.97
19639.173	54.75
18756.033	45
18459.993	35
21370.593	25



Σχήμα 9: Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα

Παρατηρούμε πως ο κόμβος ανάσχεσης είναι στους $227\text{ }^{\circ}\text{C}$ το οποίο σημαίνει πως τα περισσότερα θερμά ρεύματα που υπάρχουν δεν μπορούν να συνεισφέρουν στην λανθάνουσα θερμότητα του ατμού που τροφοδοτείται για την έκρηξη ατμού. Επίσης φαίνεται πως μία μεγάλη ενθαλπία απαιτείται για ψύξη, η οποία εν μέρει ευθύνεται και αυτή στην λανθάνουσα θερμότητα υδατικών ρευμάτων. Σε πρώτη φάση θα δούμε τι μπορεί να ολοκληρωθεί στην διεργασία.

4.3 Σχόλια για την ολοκλήρωση διάφορων κομματιών

4.3.1 Αντιδραστήρας παραγωγής γλυκερόλης

Ο αντιδραστήρας λειτουργεί στους 30 βαθμούς κελσίου και είναι εξώθερμος. Στο μεγάλο σύνθετο γράφημα θα έμπαινε στους $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ το οποίο είναι κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης. Λόγω της πολύ στενής θερμοκρασιακής περιοχής στην οποία μπορεί να διεξαχθεί η αντίδραση, θεωρούμε πως δεν αξίζει να μελετηθεί ένα σενάριο ολοκλήρωσης του αντιδραστήρα αυτού με την υπόλοιπη διεργασία, καθώς σε κάθε περίπτωση απλώς θα αυξάνει την απαίτηση σε ψυχρή παροχή.

4.3.2 Αποστακτική στήλη γλυκερόλης

Ο αναβραστήρας της στήλης λειτουργεί στους $293\text{ }^{\circ}\text{C}$ στο ΜΣΓ και έχει απαίτηση θερμότητας στους 1105.44 MJ/hr . Ο συμπηκνωτήρας της στήλης λειτουργεί στους $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($140\text{ }^{\circ}\text{C}$ στο ΜΣΓ) με απαίτηση 149.46 MJ/hr . Καθώς ο κόμβος ανάσχεσης είναι στους $227\text{ }^{\circ}\text{C}$ και το $293\text{ }^{\circ}\text{C}$ υπερβαίνει τις θερμοκρασίες που εμφανίζονται στο ΜΣΓ για να ολοκληρωθεί η στήλη θα έπρεπε σε πρώτη φάση να λειτουργεί σε συνθήκες μειωμένης πίεσης (πχ απόσταξη υπό κενό). Λόγω του αρκετά αυξημένου λειτουργικού κόστους μίας τέτοιας διεργασίας, κρίνεται ακατάλληλο ως ιδέα.

4.3.3 Αντιδραστήρας παραγωγής φουρφουράλης

Θερμοκρασία λειτουργίας οι $242\text{ }^{\circ}\text{C}$, ή $237\text{ }^{\circ}\text{C}$ στο μεγάλο σύνθετο γράφημα. Ο αντιδραστήρας είναι εξώθερμος, και λειτουργεί ισοθερμοκρασιακά πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης. Επίσης, η απαίτηση του σε ψύξη είναι αρκετά χαμηλή (13.35 MJ/hr) άρα είναι αρκετά εύκολο να χωρέσει. Η ολοκλήρωση του βελτιώνει την διεργασία, βέβαια λόγω του πολύ μικρού θερμικού φορτίου, την βελτιώνει ελάχιστα.

4.3.4 Αντιδραστήρας παραγωγής κυκλοπεντανόνης

Ο αντιδραστήρας αυτός λειτουργεί στους $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ και είναι εξώθερμος (ως αντίδραση υδρογόνωσης). Αυτό είναι κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης και μάλιστα αρκετά, άρα η ολοκλήρωση δεν θεωρείται εφικτή.

4.3.5 Αποστακτική στήλη κυκλοπεντανόνης

Ο συμπηκνωτήρας είναι ένα θερμό ρεύμα στους $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($45\text{ }^{\circ}\text{C}$ στο ΜΣΓ) με θερμότητα 8971.67 MJ/hr ενώ ο αναβραστήρας είναι ένα ψυχρό ρεύμα στους 130 ($135\text{ }^{\circ}\text{C}$ στο ΜΣΓ) με θερμότητα 9545.79 MJ/hr . Και οι 2 θερμοκρασίες είναι κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης και υπάρχει σίγουρα το περιθώριο να γίνει μία ολοκλήρωση. Η ολοκλήρωση της στήλης θα γίνει αφαιρώντας 9545.79 MJ/hr στη θερμοκρασία του αναβραστήρα και επιστρέφοντας 8971.67 MJ/hr στην θερμοκρασία του συμπηκνωτήρα.

4.3.6 Αντιδραστήρας σακχαροποίησης

Ο αντιδραστήρας λειτουργεί στους $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ και είναι ενδόθερμος (45 στο ΜΣΓ). Είναι κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης και έχει απαίτηση 393.63 MJ/hr άρα η ολοκλήρωση του είναι αρκετά εύκολη.

4.3.7 Αλλαγές στο ΜΣΓ

Η ολοκλήρωση των αντιδραστήρων παραγωγής της φουρφουράλης και της σακχαροποίησης είναι εφικτή και μειώνει την απαίτηση της διεργασίας σε θερμά και ψυχρά ρεύματα αντίστοιχα, παρόλο που η επίδραση τους δεν είναι τόσο μεγάλη. Η αποστακτική της φουρφουράλης προκαλεί μία σημαντική αλλαγή στο ΜΣΓ η οποία οδηγεί στον διαχωρισμό να είναι πρακτικά δωρεάν και να δημιουργείται και μία ενεργειακή τσέπη λόγω της ολοκλήρωσης αυτής.

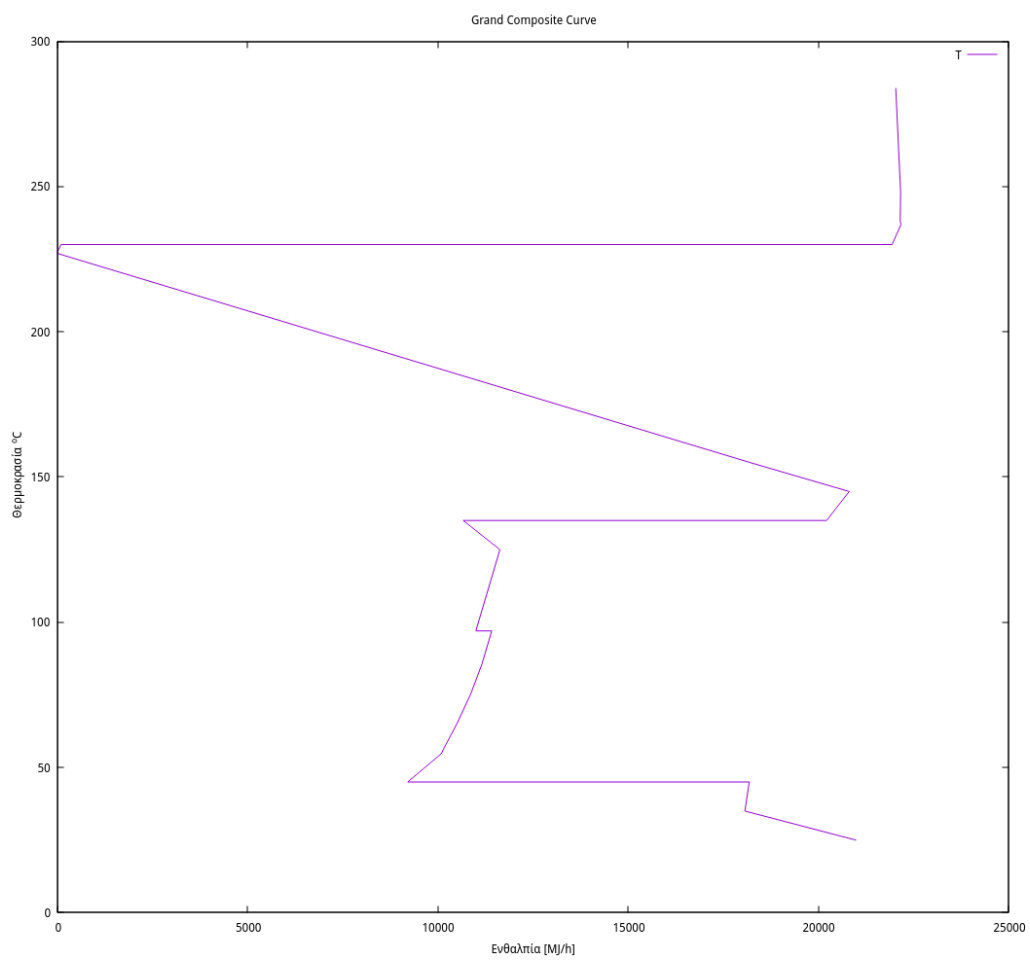
Παρακάτω παρατίθεται και το ΜΣΓ στο οποίο έχουν γίνει οι δύο αυτές προσθήκες.

Πίνακας 12: Δεδομένα για τον ενεργειακό καταρράκτη

Cumulative Dh	T
22029.075	283.9
22157.741	248
22146.601	238
22169.010	237
21931.525	230.01
101.925	230
0	227
18195	155
20806.8	145
20473.65	139.4
20215.16	135
10669.37	135
11632.97	125
11000.68	97.01
11418.51	97
11162.11	85.65
10875.63	75.65
10852.067	74.9
10495.957	64.9
10174.817	56.97
10093.383	54.75
9210.243	45
18181.913	45
18066.363	35
20977	25

4.4 Περαιτέρω εκμετάλλευση της περιοχής κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης

Ακόμη και μετά την ολοκλήρωση των διεργασιών αυτών βλέπουμε πως υπάρχει μία μεγάλη αυτόνομη περιοχή από τους $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ μέχρι τους $190\text{ }^{\circ}\text{C}$. Βλέποντας έτσι το ΜΣΓ, 11766.8 MJ/hr ψυχρή παροχή απαιτείται για ψύξη ρευμάτων σε θερμοκρασίες από $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ και κάτω. Τα υπόλοιπα 9210.2 MJ/hr χρησιμοποιούνται για ψύξη ρευμάτων σε θερμοκρασίες από 190



Σχήμα 10: Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα μετά την ολοκλήρωση 3 διεργασιών

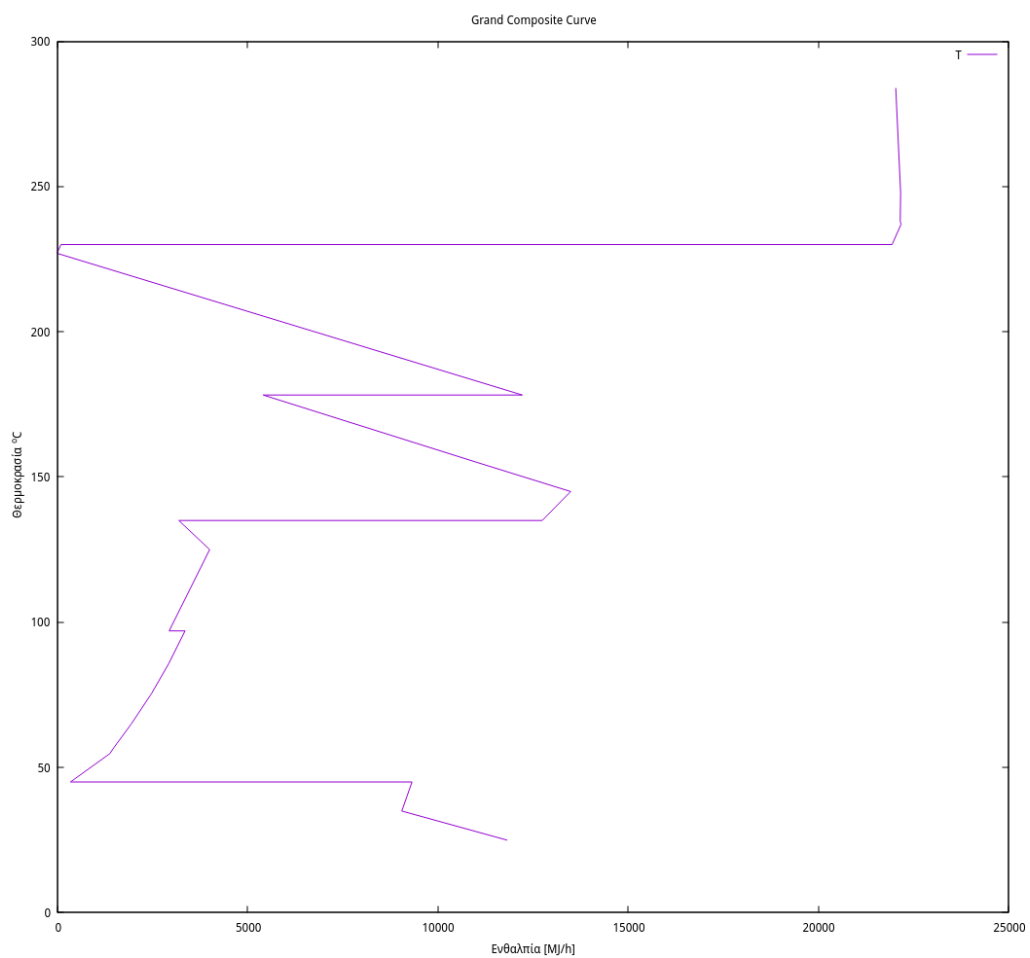
$^{\circ}\text{C}$ έως 227°C . Το βασικό θερμό ρεύμα στην περιοχή αυτή είναι οι ατμοί της έκρηξης ατμού μετά την διεργασία εκείνη. Είναι ατμός σε πολύ υψηλή πίεση (26 bar) ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ολοκλήρωση διάφορων κομματιών και παραμένει ένα αρκετά θερμό ρεύμα για ατμοπαραγωγή.

Η θερμοκρασία 190°C για ένα θερμό είναι στην πραγματικότητα 185°C . Άρα, η παραγωγή ατμού μπορεί να γίνει στους 175°C μέγιστο. Η πίεση στην οποία το νερό αυτό θα υγροποιούνταν είναι 8.93 bar, άρα για ατμοπαραγωγή η υψηλότερη βαθμίδα πίεσης που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είναι τα 8.5 bar. Με βάση το θερμικό περιεχόμενο που υπάρχει διαθέσιμο, μπορεί η παροχή του ατμού αυτού να είναι 176.7 kmol/hr . Άρα, για να μειώσουμε τις απαιτήσεις σε ψυχρή παροχή, βάζουμε ένα νέο ψυχρό ρεύμα στο ΜΣΓ το οποίο πάει από τους 25°C στους 180°C . Η αισθητή θερμότητα της μεταβολής είναι 2389.9 MJ/hr μέχρι τους 178.1°C , η λανθάνουσα (θα βάλουμε στον πίνακα μεταβολή από 178.1 μέχρι 178.2) θα έχει μεταβολή 6804.2 MJ/hr και τα υπόλοιπα 16 είναι από τους 178.2 μέχρι τους 180.

Πίνακας 13: Δεδομένα για τον ενεργειακό καταρράκτη με ατμοπαραγωγή

Cumulative Dh	T
22029.075	283.9
22157.741	248
22146.601	238
22169.010	237
21931.525	230.01
101.924	230
0	227
12220	178.2
5415.8	178.2
11033.056	155
13490.656	145
13071.154	139.4
12744.816	135
3199.029	135
4008.425	125
2944.530	97.01
3362.205	97
2930.789	85.65
2490.108	75.65
2454.980	74.9
1944.670	64.9
1501.250	56.97
1385.583	54.75
352.099	45
9323.769	45
9054.019	35
11810.456	25

Έτσι, μειώνουμε σημαντικά την απαίτηση σε ψυχρές παροχές καθώς πλέον μόνο ότι χρειάζεται κάτω από τους 45°C πρέπει να δωθεί από ψυχρές παροχές και η υπόλοιπη απαίτηση δεν θεωρείται ψυχρή παροχή, αλλά ενσωματωμένη ατμοπαραγωγή. Ότι είναι πάνω από την περιοχή αυτή έχει γίνει πρακτικά αυτόνομη περιοχή λόγω της μεγάλης τσέπης που έχει δημιουργηθεί.



Σχήμα 11: Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα μετά την ενσωμάτωση ατμοπαραγωγής

4.5 Συμπεράσματα της ενεργειακής ολοκλήρωσης

Συμπέρασμα ότι με την ενεργειακή ολοκλήρωση αυτή έχουμε τα εξής:

Απαίτηση σε ψυχρή παροχή 11810.46 MJ/h σε θερμοκρασία κάτω από 25 °C στο ΜΣΓ (δηλαδή κάτω από 20 °C, άρα στους 15 °C πχ).

Απαίτηση σε θερμή παροχή: 22029.08 MJ/h. Αυτό πρακτικά οφείλεται στην λανθάνουσα θερμότητα του ατμού που χρησιμοποιείται στο steam explosion και θα καλυφθεί εκμαστεύοντας μία ποσότητα ατμού σε υψηλή πίεση (60 bar) από το ενσωματωμένο κύκλο Rankine της διεργασίας με παροχή τέτοια ώστε να επαρκεί για να καλύψει την ανάγκη αυτή. Ο ατμός αυτός βγαίνει στους 497.5 °C από τον στρόβιλο υψηλής πίεσης και θα αξιοποιηθεί ως έχει καθώς η παροχή του είναι ρυθμισμένη για να καλύψει την απαίτηση που υπάρχει. Μετά την εναλλαγή, ανακυκλώνεται στο κύκλο Rankine μιας και δεν μπορεί να γίνει κάτι άλλο.

Επίσης πρέπει να υπάρχουν διαθέσιμες ψυχρές παροχές για την ψύξη των αντιδραστήρων παραγωγής φουρφουράλης και γλυκερόλης, του συμπηκνωτήρα της αποστακτικής στήλης της γλυκερόλης και τέλος θερμή παροχή για τον αναβραστήρα της στήλης εκείνης.

5 Σχεδιασμός δικτύου εναλλαγής θερμότητας

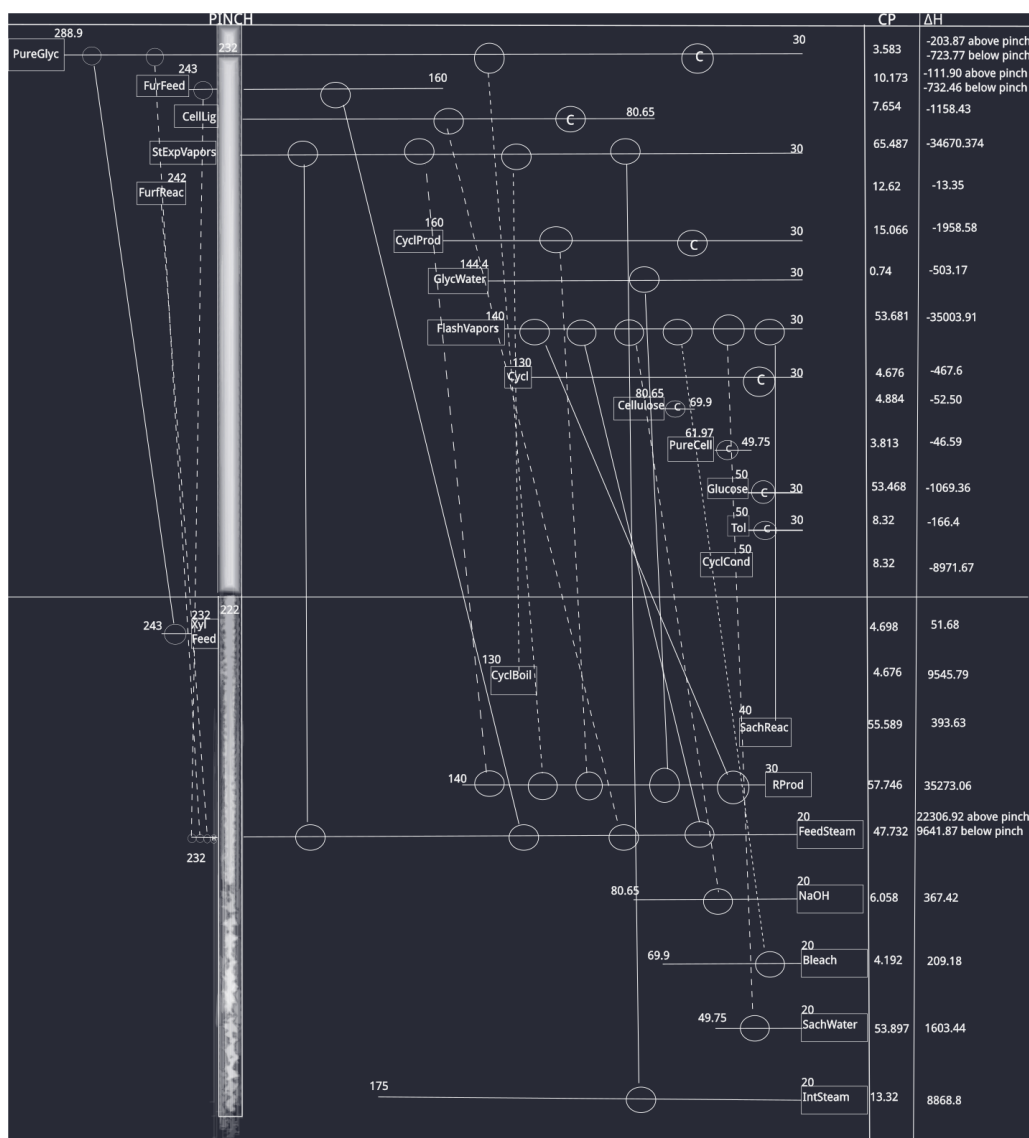
Έχοντας δει όλη την διεργασία και έχοντας κάνει την βέλτιστη δυνατή ενεργειακή ολοκλήρωση, πρέπει να σχεδιαστεί ένα δίκτυο εναλλαγής θερμότητας για την διεργασία με βάση το οποίο θα βρούμε ποιο ρεύμα εναλλάσει με ποιο. Αρχικά, αξίζει να δούμε σε έναν πίνακα όλα τα ρεύματα της διεργασίας και ότι θέλουμε να ολοκληρώσουμε.

Πίνακας 14: Ρεύματα της διεργασίας

Ρεύμα	Είδος	CP (MJ/h K)	T _{in} (C)	T _{out} (C)
FeedSteam	Ψυχρό	47.732	25	237
StExpVapors	Θερμό	65.487	227	25
CellLig	Θερμό	7.654	227	75.65
NaOH	Ψυχρό	6.058	25	85.65
Bleach	Ψυχρό	4.192	25	74.9
Cellulose	Θερμό	4.884	75.65	64.9
PureCell	Θερμό	3.813	56.97	44.75
SachWater	Ψυχρό	53.897	25	54.75
Glucose	Θερμό	53.468	45	25
RProd	Ψυχρό	57.746	35	145
FlashVapors	Θερμό	53.681	135	25
GlycWater	Θερμό	0.740	139.4	25
PureGlyc	Θερμό	3.583	283.9	25
XylFeed	Ψυχρό	4.698	237	248
FurFeed	Θερμό	10.173	238	155
CyclProd	Θερμό	15.066	155	25
Cycl	Θερμό	4.676	125	25
Tol	Θερμό	8.32	45	25
FurfReac	Θερμό	7.436	237	237
SachReac	Ψυχρό	55.589	45	45
CyclCond	Θερμό	8.32	45	45
CyclBoil	Ψυχρό	4.676	135	135
IntSteam	Ψυχρό	13.32	25	180

Για τον υπολογισμό της θερμοχωρητικότητας των ρευμάτων των 2 αντιδραστήρων, καθώς μεταβάλλεται, προσεγγίζουμε την τιμή της ως τον μέσο όρο του ρεύματος εισόδου και του ρεύματος εξόδου. Για την αποστακτική, το CP είναι ίδιο με το CP του αντίστοιχου προϊόντος καθώς δεν υπάρχει χημική μεταβολή στον συμπηκνωτήρα ή τον αναβραστήρα. Τέλος, για το ρεύμα IntSteam (ενσωματωμένη ατμοπαραγωγή), ξέρουμε την παροχή που μπορούμε να προσφέρουμε στο σύστημα με βάση το ΜΣΓ και άρα υπολογίζεται εύκολα το CP.

Με βάση τις πληροφορίες αυτές μπορεί να φτιαχτεί το διάγραμμα πλέγματος της διεργασίας πάνω στο οποίο θα βασιστεί και ο σχεδιασμός του δικτύου εναλλαγής θερμότητας. Αξίζει να αναφερθεί πως στο διάγραμμα πλέγματος που παρατίθεται φαίνονται και οι εναλλάκτες που θα χρησιμοποιηθούν. Η διαδικασία με την οποία τοποθετήθηκαν φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 12: Διάγραμμα Πλέγματος της διεργασίας

Από το διάγραμμα πλέγματος, είναι εμφανές πως το κομμάτι της διεργασίας που βρίσκεται πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης είναι αρκετά απλό (3 θερμά και 2 ψυχρά) ενώ το κομμάτι κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης θέλει αρκετή δουλειά. Η λύση που προτείνεται για την περιοχή πάνω από τον κόμβο είναι μάλλον μία από τις καλύτερες δυνατές καθώς δεν υπάρχουν πολλοί βαθμοί ελευθερίας λόγω των λίγων ρευμάτων. Και έτσι και αλλιώς και χωρίς να γινόταν

καθόλου ολοκλήρωση, η ουσιαστική απαίτηση που υπάρχει σε αυτό το θερμοκρασιακό εύρος είναι η θέρμανση του FeedSteam.

Αντίθετως κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης, υπάρχουν πάρα πολλά ρεύματα και πρακτικά άπειροι δυνατοί συνδυασμοί καθώς μόνο ένα ρεύμα έχει υποχρεωτικό βαθμό ελευθερίας επειδή μπαίνει στον κόμβο ανάσχεσης. Ως αποτέλεσμα, το δίκτυο εναλλαγής που θα προταθεί δεν θα είναι σίγουρα το καλύτερο δυνατό αλλά μόνο ένα πιθανό σενάριο το οποίο δεν έχει πάρα πολύ μεγάλη απόκλιση από το βέλτιστο. Για να βρεθεί το πραγματικό βέλτιστο θα απαιτούνταν μία βελτιστοποίηση σε κατάλληλο λογισμικό (όπως πχ το GAMS). Όμως, ακόμη και εκεί, το πρόβλημα βελτιστοποίησης θα ήταν πάρα πολύ περίπλοκο λόγω του πλήθους των ρευμάτων. Σίγουρα ούτε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης θα έβρισκε την πραγματικά βέλτιστη λύση, αλλά ένα τοπικό ακρότατο, το οποίο ενδέχεται να ήταν και μία πολύ περίπλοκη και όχι πρακτικά εφικτή λύση. Για αυτό, δεν έγινε κάποια προσπάθεια να φτάσουμε έστω και κοντά στο πραγματικό βέλτιστο και απλώς αποδεχτήκαμε την απλούστερη δυνατή δομή του δικτύου η οποία ολοκληρώνει τα ρεύματα που είναι σημαντικό να ολοκληρωθούν μεταξύ τους.

5.1 Υπολογισμός Ενθαλπιών

Για να μπορέσουμε να κάνουμε τους υπολογισμούς του δικτύου, πρέπει πρώτα να φτιάξουμε έναν συγκεντρωτικό πίνακα που δείχνει την ενθαλπία κάθε ρεύματος ξεχωριστά.

Πίνακας 15: Συγκεντρωτικός πίνακας ρευμάτων με ενθαλπίες

Ρεύμα	Είδος	CP (MJ/h K)	ΔH_{tot} (MJ/h)
PureGlyc	Θερμό	3.583	-927.6387
FurFeed	Θερμό	10.173	-844.359
CellLig	Θερμό	7.654	-1158.4329
StExpVapors	Θερμό	65.487	-34670.374
FurfReac	Θερμό	7.436	-13.35
CyclProd	Θερμό	15.066	-1958.58
GlycWater	Θερμό	0.740	-503.166
FlashVapors	Θερμό	53.681	-35003.91
Cycl	Θερμό	4.676	-467.6
Cellulose	Θερμό	4.884	-52.503
PureCell	Θερμό	3.813	-46.59486
Glucose	Θερμό	53.468	-1069.36
Tol	Θερμό	8.32	-166.4
CyclCond	Θερμό	8.32	-8971.67
XylFeed	Ψυχρό	4.698	51.678
CyclBoil	Ψυχρό	4.676	9545.79
SachReac	Ψυχρό	55.589	393.63
RProd	Ψυχρό	57.746	35273.06
FeedSteam	Ψυχρό	47.732	31948.784
NaOH	Ψυχρό	6.058	367.4177
Bleach	Ψυχρό	4.192	209.1808
SachWater	Ψυχρό	53.897	1603.4358
IntSteam	Ψυχρό	13.32	8868.8

Από αυτά τα ρεύματα, 3 (PureGlyc, FurFeed, FeedSteam) παίρνουν μέσα από τον κόμβο ανάσχεσης, άρα η ενθαλπία αυτή δεν είναι χαρακτηριστική και πρέπει να χωρίσει στα 2. Για τα ρεύματα PureGlyc και FurFeed, η αλλαγή έγκειται απλώς σε δύο υπολογισμούς της λανθάνουσας θερμότητας αντί για έναν. Στο FeedSteam, όλη η λανθάνουσα είναι πάνω από τον

κόμβο ανάσχεσης ενώ απαιτούνται 2 υπολογισμοί για την αισθητή. Στον παρακάτω πίνακα τα ρεύματα αυτά έχουν χωριστεί με χρήση δεικτών a (above pinch) και b (below pinch).

Πίνακας 16: Συγκεντρωτικός πίνακας ρευμάτων με ενθαλπίες

Ρεύμα	Είδος	CP (MJ/h K)	ΔH_{tot} (MJ/h)
PureGlyc _a	Θερμό	3.583	-203.8727
PureGlyc _b	Θερμό	3.583	-723.766
FurFeed _a	Θερμό	10.173	-111.903
FurFeed _b	Θερμό	10.173	-732.456
CellLig	Θερμό	7.654	-1158.4329
StExpVapors	Θερμό	65.487	-34670.374
FurfReac	Θερμό	7.436	-13.35
CyclProd	Θερμό	15.066	-1958.58
GlycWater	Θερμό	0.740	-503.166
FlashVapors	Θερμό	53.681	-35003.91
Cycl	Θερμό	4.676	-467.6
Cellulose	Θερμό	4.884	-52.503
PureCell	Θερμό	3.813	-46.59486
Glucose	Θερμό	53.468	-1069.36
Tol	Θερμό	8.32	-166.4
CyclCond	Θερμό	8.32	-8971.67
XylFeed	Ψυχρό	4.698	51.678
CyclBoil	Ψυχρό	4.676	9545.79
SachReac	Ψυχρό	55.589	393.63
RProd	Ψυχρό	57.746	35273.06
FeedSteam _a	Ψυχρό	47.732	22306.92
FeedSteam _b	Ψυχρό	47.732	9641.864
NaOH	Ψυχρό	6.058	367.4177
Bleach	Ψυχρό	4.192	209.1808
SachWater	Ψυχρό	53.897	1603.4358
IntSteam	Ψυχρό	13.32	8868.8

5.2 Δίκτυο εναλλαγής θερμότητας πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης

Πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης έχουμε τα εξής ρεύματα

Πίνακας 17: Ρεύματα πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης

Ρεύμα	Είδος	CP (MJ/h K)	ΔH_{tot} (MJ/h)
PureGlyc _a	Θερμό	3.583	-203.8727
FurFeed _a	Θερμό	10.173	-111.903
FurfReac	Θερμό	7.436	-13.35
XylFeed	Ψυχρό	4.698	51.678
FeedSteam _a	Ψυχρό	47.732	22306.92

Ξεκινάμε από τον κόμβο ανάσχεσης. Θέλουμε τα ρεύματα που μπαίνουν στον κόμβο (θερμά) να είναι λιγότερα ή ίσα από αυτά που βγαίνουν (ψυχρά) και τα θερμά να έχουν μικρότερα CP από τα ψυχρά. Δεν ασχολούμαστε με το FurfReac (αντιδραστήρας παραγωγής φουρφουράλης) καθώς είναι μακριά από τον κόμβο. Άρα έχουμε 2 θερμά, 2 ψυχρά. Το ρεύμα

PureGlyc έχει μικρότερο CP και από τα δύο ψυχρά άρα μπορεί να ταιριάζει με οποιοδήποτε ενώ το FurFeed έχει μεγαλύτερο CP από το XylFeed άρα πρέπει αναγκαστικά να ταιριάζει με το FeedSteam. Αν ταιριάζουμε άρα το PureGlyc με το XylFeed, το φορτίο που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είναι 51.678 MJ/h το οποίο είναι όσο χρειάζεται το XylFeed. Το FurFeed, το υπόλοιπο PureGlyc και το FurfReac με αυτήν την σειρά μπορούν να εναλλάξουν με το FeedSteam καλύπτοντας όλες τους τις ενεργειακές απαιτήσεις, ενώ οι περίσσεια θερμότητας του FeedSteam θα καλυφθεί από θερμές παροχές.

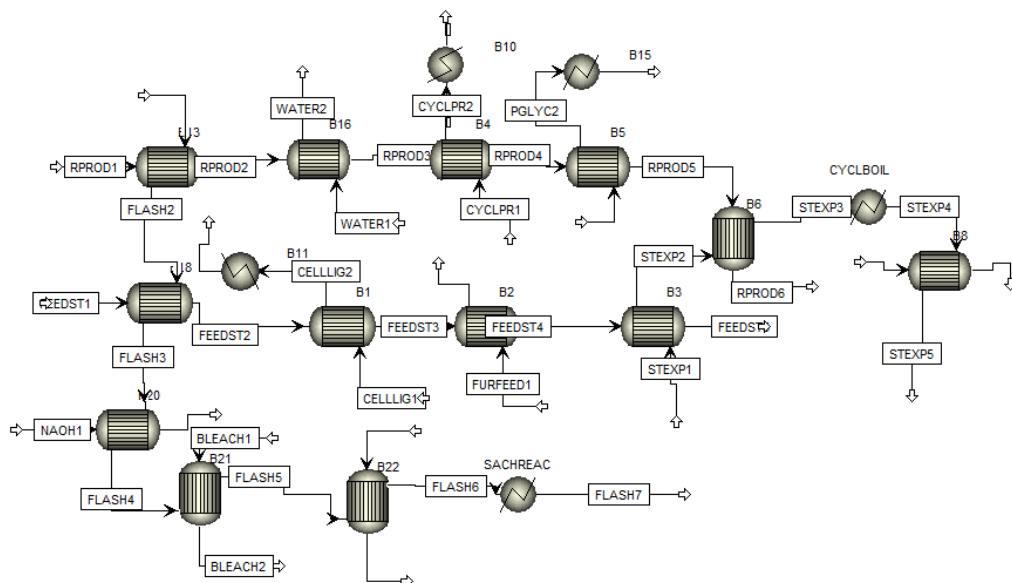
5.3 Δίκτυο εναλλαγής θερμότητας κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης

Κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης έχουμε τα εξής ρεύματα.

Πίνακας 18: Ρεύματα κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης

Ρεύμα	Είδος	CP (MJ/h K)	ΔH_{tot} (MJ/h)
PureGlyc _b	Θερμό	3.583	-723.766
FurFeed _b	Θερμό	10.173	-732.456
CellLig	Θερμό	7.654	-1158.4329
StExpVapors	Θερμό	65.487	-34670.374
CyclProd	Θερμό	15.066	-1958.58
GlycWater	Θερμό	0.740	-503.166
FlashVapors	Θερμό	53.681	-35003.91
Cycl	Θερμό	4.676	-467.6
Cellulose	Θερμό	4.884	-52.503
PureCell	Θερμό	3.813	-46.59486
Glucose	Θερμό	53.468	-1069.36
Tol	Θερμό	8.32	-166.4
CyclCond	Θερμό	8.32	-8971.67
CyclBoil	Ψυχρό	4.676	9545.79
SachReac	Ψυχρό	55.589	393.63
RProd	Ψυχρό	57.746	35273.06
FeedSteam _b	Ψυχρό	47.732	9641.864
NaOH	Ψυχρό	6.058	367.4177
Bleach	Ψυχρό	4.192	209.1808
SachWater	Ψυχρό	53.897	1603.4358
IntSteam	Ψυχρό	13.32	8868.8

Υπάρχουν 13 θερμά και 8 ψυχρά και αναμένεται να υπάρξει μία μεγάλη απάτηση σε ψυχρή παροχή. Το σύστημα που θεωρήθηκε φαίνεται παρακάτω



5.3.1 Επεξήγηση του συστήματος που θεωρήθηκε

Βασιζόμαστε στο ότι τα δύο πιο απαιτητικά ψυχρά είναι το RProd και το FeedSteam. Και τα δύο προθερμαίνονται μέχρι τους $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ με το FlashVapors το οποίο είναι το ρεύμα με τη μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα αλλά σε χαμηλή θερμοκρασία άρα δεν μπορεί να τα φτάσει μέχρι την τελική τους θερμοκρασία. Το ρεύμα αυτό μπορεί μετά την προθέρμανση αυτών να χρησιμοποιηθεί και για κάθε άλλο ψυχρό ρεύμα εκτός από τον αναβραστήρα της αποστακτικής της κυκλοπεντανόνης. Καταλήγει ως ένα μίγμα υγρού-ατμού χαμηλής ποιότητας.

Μετά την προθέρμανση, χρησιμοποιούμε όσα θερμά ρεύματα της διεργασίας έχουμε διαθέσιμα σε θερμοκρασίες πάνω από τους $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ για να αυξήσουμε την θερμοκρασία των δύο ψυχρών και τα δύο ολοκληρώνονται από το StExpVapors, το άλλο σημαντικό θερμό ρεύμα της διεργασίας. Αυτό πρέπει πρώτα να εναλλάξει με το FeedSteam καθώς είναι το μόνο που μπορεί να το φέρει στους $222\text{ }^{\circ}\text{C}$ και άρα είναι υποχρεωτικός βαθμός ελευθερίας. Έπειτα θερμαίνει ότι χρειάζεται από το RProd, θερμαίνει τον αναβραστήρα της αποστακτικής της κυκλοπεντανόνης και τέλος, παράγει τον ενσωματωμένο ατμό της διεργασίας στα 8.5 bar . Μετά από όλα αυτά έχουμε εκμεταλλευτεί πρακτικά όλη την λανθάνουσα θερμότητα του ρεύματος, το οποίο καταλήγει ως ένα ρεύμα στους $166\text{ }^{\circ}\text{C}$ το οποίο όμως λόγω της υψηλής πίεσης είναι πλήρως υγροποιημένο (εκτός του αερίου CO_2 που έχει). Δεν έχει νόημα να το εκμεταλλευτούμε περαιτέρω καθώς δεν μπορεί να θερμάνει κάποιο άλλο ψυχρό και η χρήση του για ατμοπαραγωγή έχει πρακτικά εξαλειφθεί.

Τα ρεύματα Cellig, PureGlyc και CyclProd που έχουν χρησιμοποιηθεί σε ένα στάδιο της ολοκλήρωσης ψύχονται μέχρι τις θερμοκρασίες που πρέπει με ψυκτικό μέσο καθώς δεν βρέθηκε κάποιο ψυχρό ρεύμα για να εναλλάξει με αυτά μέχρι την τελική απαίτηση που υπήρχε, ενώ τα ρεύματα Cycl, Cellulose, PureCell, Glucose, Tol ψύχονται αποκλειστικά με ψυχρή παροχή. Βέβαια, οι απαιτήσεις όλων αυτών των ρευμάτων ανέρχονται περίπου στα 2500 MJ/hr . Αξίζει να σημειωθεί πως επίσης δεν έχει ολοκληρωθεί ο συμπηκνωτήρας της κυκλοπεντανόνης, ο οποίος έχει σημαντικό θερμικό φορτίο (περίπου 9000 MJ/hr). Αυτό βέβαια είναι σχετικά αναμενόμενο καθώς η περιοχή του ΜΣΓ η οποία χρειάζεται την ψυχρή παροχή έχει ένα μεγάλο οριζόντιο τμήμα που είναι αυτός ο συμπηκνωτήρας. Βέβαια, όπως είδαμε και πριν την ολοκλήρωση, η απαίτηση αυτή θα υπήρχε έτσι και αλλιώς, απλώς βάζοντας τον συμπηκνωτήρα πετυχαίνουμε καλύτερη ολοκλήρωση. Αν υποθέσουμε πως αφήνουμε τα πρακτικά υγρά υδατικά ρεύματα FlashVapors, StExpvapors και GlycWater στις θερμοκρασίες

που είναι, η απαίτηση είναι 11500 MJ/h περίπου. Αν τα ψύξουμε μέχρι τους 20 °C όπως θεωρήθηκε αρχικά για την δημιουργία του ΜΣΓ, είναι προφανές πως η απαίτηση σε ψυχρή παροχή θα είναι αρκετά μακριά από την θεωρητική ελάχιστη. Αυτό δείχνει κιόλας πως η επιλογή σίγουρα δεν είναι από τις καλύτερες. Όμως, η ψύξη των ρευμάτων αυτών, τα οποία έχουν ήδη εξαλείψει ένα αρκετά σημαντικό ποσό της θερμικής τους απαίτησης δεν είναι σίγουρο πως είναι απαραίτητη. Δεν υπάρχει κάποιο άλλο ρεύμα που αξίζει να προθερμάνουν και είναι πρακτικά στην υγρή φάση άρα σίγουρα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ατμοπαραγωγή.

6 Blocks της διεργασίας μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση

Έχοντας δει την ενεργειακή ολοκλήρωση και το δίκτυο εναλλαγής θερμότητας που προτείνεται, έπρεπε να περαστεί αυτό και στα Aspen. Καθώς σε αρκετές περιπτώσεις έπρεπε να εναλλάξουν ρεύματα από διαφορετικά αρχεία Aspen (λόγω των πολλών blocks της διεργασίας), χρησιμοποιήθηκε μία πιο συστηματική ονοματολογία στα τελικά αρχεία ώστε να είναι εύκολο να δει κάποιος από ποιο σημείο της διεργασίας έρχεται ένα άλλο ρεύμα. Επίσης, η ονοματολογία βοηθάει και στην κοστολόγηση των εναλλακτών. Πολλοί εναλλάκτες μπαίνουν σε δύο αρχεία καθώς τα ρεύματα είναι από διαφορετικά αρχεία. Ο κανόνας που θα ακολουθηθεί είναι πως η κοστολόγηση τους θα γίνει στο block το οποίο αναφέρεται στο όνομα τους.

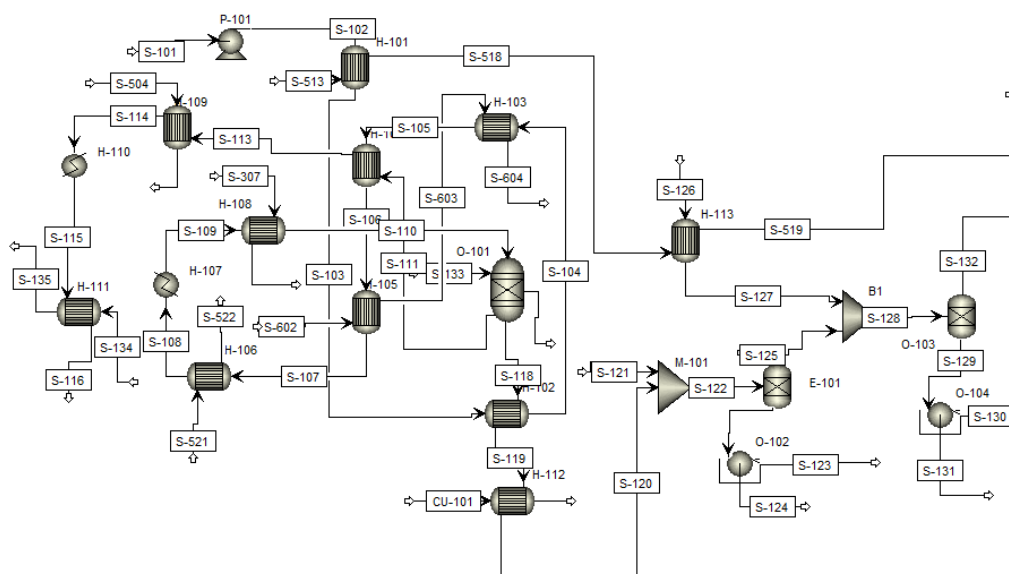
Η ονοματολογία θα βασιστεί σε ένα format A-XYX όπου το A θα είναι ένα γράμμα που παριστάνει τι διεργασία είναι κάτι, το X θα είναι ο αριθμός του block και τα YY θα είναι η αρίθμηση αυτών. Τα γράμματα A θα είναι τα εξής

Πίνακας 19: Ονοματολογία Διεργασίας

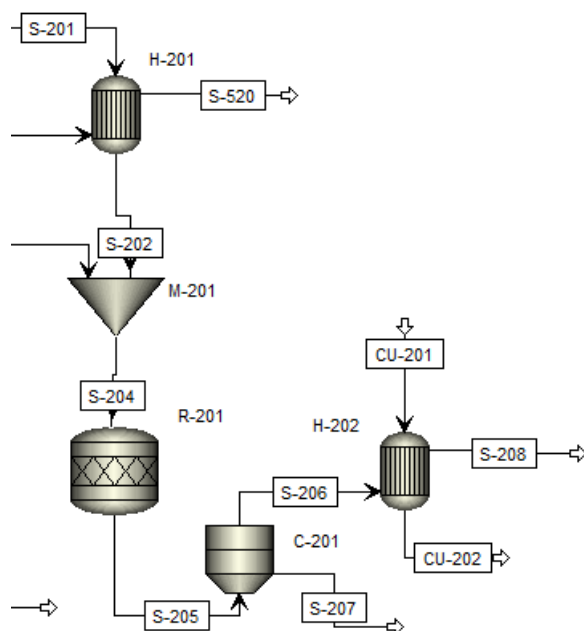
Γράμμα	Διεργασία
S	Ρεύμα Διεργασίας
HU	Θερμή Παροχή
CU	Ψυχρή Παροχή
R	Αντιδραστήρας
T	Στρόβιλος
P	Αντλία
D	Αποστακτική Στήλη
F	Απόσταξη Flash
E	Εκχύλιση
H	Εναλλάκτης
M	Αναμίκτης
C	Φυγόκεντρος
O	Άλλα

Με την ονοματολογία να έχει καλυφθεί, παρακάτω παρατίθενται εικόνες από το Aspen για τα blocks όπου έχουν ενσωματωθεί όλοι οι εναλλάκτες της προτεινόμενης ενεργειακής ολοκλήρωσης. Αξίζει να σημειωθεί πως δεν θα συμπεριληφθούν φωτογραφίες για τα blocks 300 και 400 καθώς πρακτικά δεν συμμετέχουν στην ολοκλήρωση. Το 300 έχει μοναδική συνεισφορά την εναλλαγή με το FeedSteam το οποίο φαίνεται και στην προηγούμενη εικόνα ενώ το block 400 του βιοαντιδραστήρα δεν έχει μεταβολές στην θερμοκρασία.

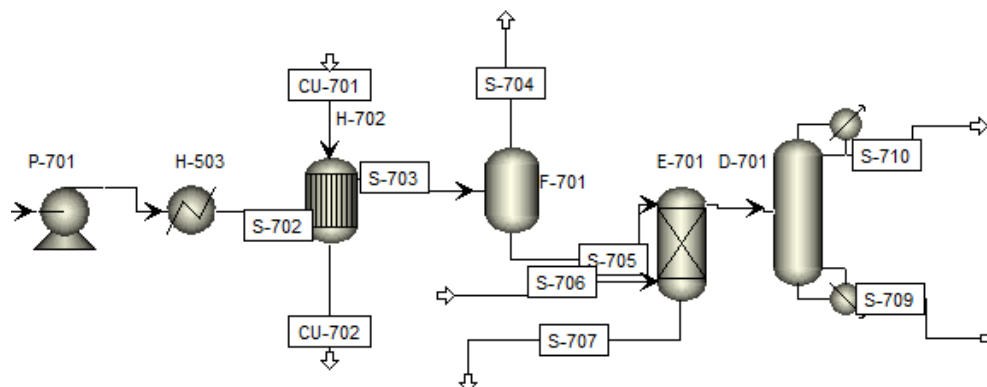
Στο block 100 υπάρχουν το FeedSteam καθώς και το StExrnavors, δύο πολύ σημαντικά ρεύματα που συνεισφέρουν σε πολύ μεγάλο ποσοστό στο τελικό ΔΕΘ. Για αυτό, το αριστερό κομμάτι του block είναι πρακτικά ένα μεγάλο κομμάτι του δικτύου το οποίο βασίζεται στα δύο αυτά ρεύματα.



Σχήμα 13: Block 100 στο Aspen



Σχήμα 14: Block 200 στο Aspen



Σχήμα 17: Block 700 στο Aspen

7 Κοστολόγηση της διεργασίας

Εφόσον έχει γίνει η ολοκλήρωση της διεργασίας, έχουμε πλέον την βέλτιστη δυνατή μονάδα και πρέπει να γίνει η ολοκληρωμένη κοστολόγηση της για να δούμε αν αξίζει ή όχι η επένδυση. Ξεκινάμε υπενθυμίζοντας το οικονομικό δυναμικό της διεργασίας, το οποίο είχε προκύψει ίσο με 98.2 εκατομμύρια ευρώ το έτος. Αυτό το νούμερο αποτελεί το όριο του κόστους που θεωρείται αποδεκτό.

Στην ολοκληρωμένη κοστολόγηση υπάρχει ένα επιπλέον προϊόν της διεργασίας, το οποίο είναι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την λιγνίνη και είναι πάρα πολύ σημαντική σε ποσότητα. Επίσης, υπάρχει και το κόστος των βοηθητικών παροχών. Όμως, πρακτικά μόνο οι ψυχρές είναι που θα κοστολογηθούν καθώς το κύκλο συμπαραγωγής παράγει όση θερμή παροχή και όση ηλεκτρική ενέργεια χρειάζεται.

Επίσης, η ολοκληρωμένη κοστολόγηση θα περιλαμβάνει προφανώς και τον εξοπλισμό όλων των διεργασιών, το οποίο θεωρείται πως θα είναι το μεγαλύτερο κόστος της διεργασίας.