



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  
Θεοφανώ Αντωνία Πόταρη  
Στυλιανή Σταύρου  
Έλλη Πούτα

Αριθμοί Μητρώου:

ch19113  
ch19114  
ch19074  
ch19555  
ch19606  
ch19534

---

Αθήνα, 2022

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Υπενθύμιση της διεργασίας</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Αναγνώριση των blocks και των ρευμάτων σε αυτά</b>	<b>2</b>
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 . . . . .	6
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
<b>3</b>	<b>Συνολική εικόνα των ρευμάτων</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Ενεργειακή ολοκλήρωση μονάδας</b>	<b>11</b>
4.1	Υπολογισμός λανθάνουσων θερμότητων και προσθήκη τους στον παραπάνω πίνακα . . . . .	11
4.2	Δημιουργία του αρχικού ΜΣΓ . . . . .	14
4.3	Σχόλια για την ολοκλήρωση διάφορων κομματιών . . . . .	14
4.3.1	Αντιδραστήρας παραγωγής γλυκερόλης . . . . .	14
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 . . . . .	16
4.3.7	Αλλαγές στο ΜΣΓ . . . . .	16
4.4	Περαιτέρω εκμετάλλευση της περιοχής κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης . . . .	16
4.5	Συμπεράσματα της ενεργειακής ολοκλήρωσης . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Σχεδιασμός δικτύου εναλλαγής θερμότητας</b>	<b>21</b>
5.1	Υπολογισμός Ενθαλπών . . . . .	24
5.2	Δίκτυο εναλλαγής θερμότητας πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης . . . . .	24
5.3	Δίκτυο εναλλαγής θερμότητας κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης . . . . .	26
5.3.1	Επεξήγηση του συστήματος που θεωρήθηκε . . . . .	27
<b>6</b>	<b>Blocks της διεργασίας μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση</b>	<b>28</b>
<b>7</b>	<b>Κοστολόγηση της διεργασίας</b>	<b>31</b>
7.1	Υπολογισμός δείκτη ROI . . . . .	32
7.2	Blocks 100-200 - Κλασμάτωση της βιομάζας και παραγωγή γλυκόζης . . . . .	32
7.3	Block 300 - Combined Heat and Power (CHP) Production . . . . .	33
7.4	Blocks 400-500 - Παραγωγή και καθαρισμός της γλυκερόλης . . . . .	34
7.5	Blocks 600-700 - Παραγωγή και καθαρισμός κυκλοπεντανόνης . . . . .	35

## 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. Με βάση τους <sup>1</sup>, η διεργασία αυτή αποτελεί ένα βιοδιυλιστήριο 4 πλατφόρμων (C6 sugars, C5 sugars, lignin, furfural) για παραγωγή γλυκερόλης, κυκλοπεντανόνης και ηλεκτρισμό από πυρηνόξυλο. Με βάση αυτούς, μπορεί να παρατεθεί και το εξής σχήμα που περιγράφει σχηματικά όλη την διεργασία. (παρατίθεται μέσω συνδέσμου github για να φαίνεται καλύτερα καθώς είναι αρκετά μεγάλο)

[https://github.com/Vidianos-Giannitsis/Process-Design/blob/master/Diagrams/biorefinery\\_characterization.png](https://github.com/Vidianos-Giannitsis/Process-Design/blob/master/Diagrams/biorefinery_characterization.png)

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 αναχτάται 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.

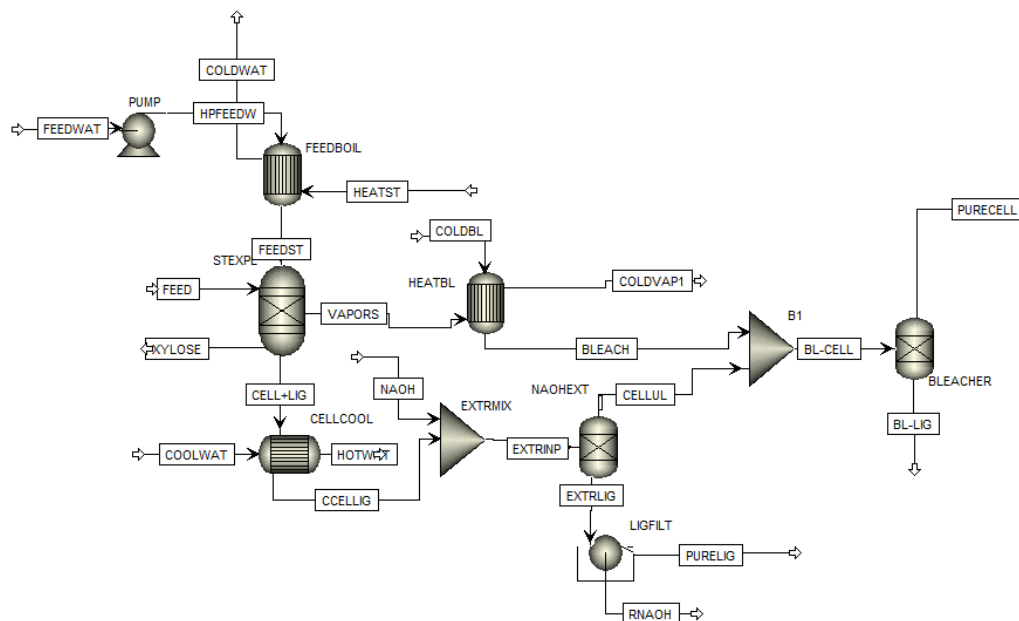
## 2 Αναγνώριση των blocks και των ρευμάτων σε αυτά

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.



Σχήμα 1: Block 100 στο Aspen

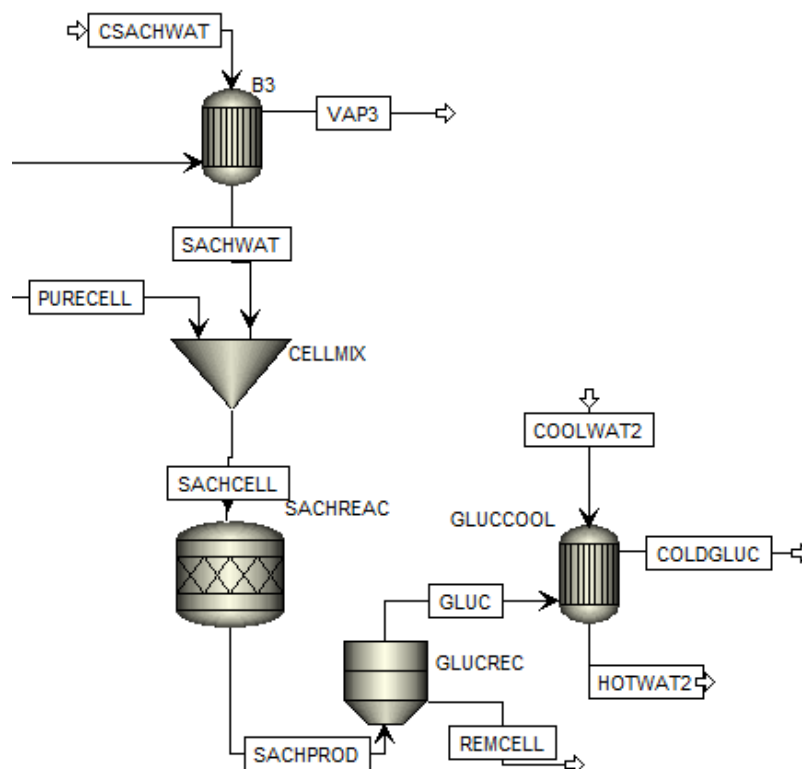
- Ατμός της τροφοδοσίας ο οποίος θερμαίνεται από θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι  $232\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ψυχρό ρεύμα). Το ρεύμα με το οποίο εναλλάσσει θερμότητα είναι βοηθητική παροχή της διεργασίας. Κάποια από την θερμότητα του προσφέρεται για την θέρμανση και διάσπαση του πυρηνόξυλου, ενώ ο υπόλοιπος ατμός, μαζί με τα υπόλοιπα ατμώδη υπολείμματα της έκρηξης (κυρίως  $\text{CO}_2$ ) διατίθενται ως ένα θερμό ρεύμα της διεργασίας. Βέβαια, αν παρατηρηθεί πως υπάρχει περίσσεια θερμικής ενέργειας, μπορεί αυτό το ρεύμα να μην χρησιμοποιηθεί.
- 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 <sub>in</sub> (C)	T <sub>out</sub> (C)	Παροχή (kmol/hr)	Σύσταση
FeedSteam	Ψυχρό	20	232	633.22	Νερό
Vapors	Θερμό	232	30	905.27	Νερό 0.92 CO <sub>2</sub> 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

## 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 °C για την υδρόλυση. Για αυτό, το νερό πρώτα θερμαίνεται μέχρι μία θερμοκρασία και μετά αναμιγνύεται με

την κυτταρίνη για τελική θερμοκρασία 49.75 °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 °C.

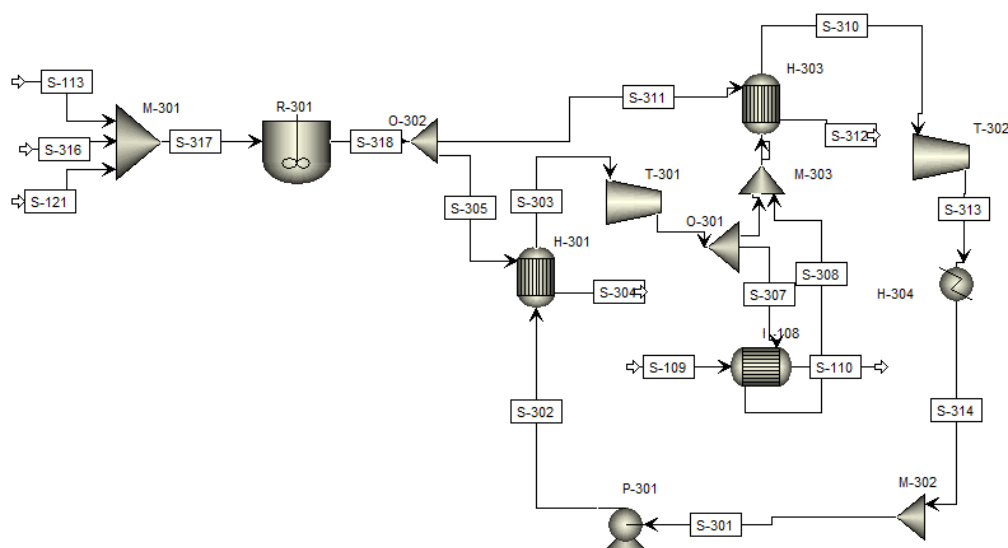
- Η γλυκόζη ψύχεται από τους 50 °C στους οποίους παράχθηκε μέχρι τους 30 °C η οποία είναι η βέλτιστη λειτουργία του αντιδραστήρα παραγωγής γλυκερόλης στο block 400.

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 <sub>in</sub> (C)	T <sub>out</sub> (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 καυσάεiria 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.

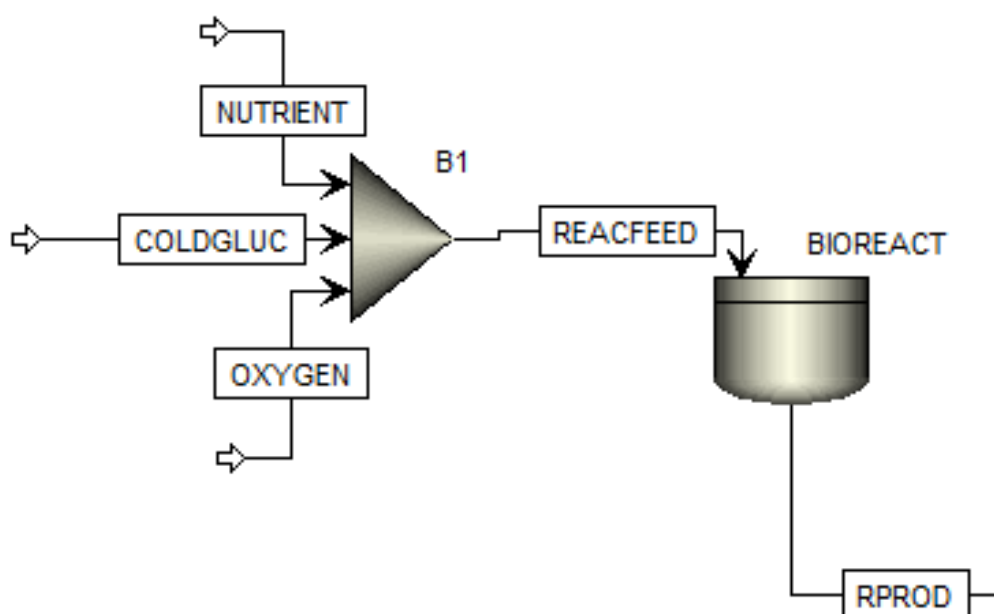


Σχήμα 3: Block 300 στο Aspen

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 υποθέτεται ότι είναι η παροχή S-307 του διαγράμματος αυτού, η οποία είναι ατμός στα 60 bar και 497.5 °C και η ποσότητα 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

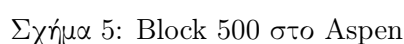
Στο block αυτό, όλα τα ρεύματα τροφοδοτούνται στους 30 °C και αντιδρούν σε αντιδραστήρα σταθερής θερμοκρασίας. Άρα, δεν υπάρχει καμία μεταβολή στην θερμοκρασία των ρευμάτων και άρα κανένα θερμό ή ψυχρό ρεύμα να χρησιμοποιηθεί.

## 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 °C για flash και έπειτα απόσταξη (ψυχρό ρεύμα).



- | Πεύμα        | Είδος | T <sub>in</sub> (C) | T <sub>out</sub> (C) | Παροχή (kmol/hr) | Σύσταση  |
|--------------|-------|---------------------|----------------------|------------------|--|
| RProd        | Ψυχρό | 30                  | 140                  | 774.29           | Νερό 0.89<br>CO <sub>2</sub> 0.08<br>Γλυκερόλη 0.02<br>Άλλα 0.01 |
| FlashVaps    | Θερμό | 140                 | 30                   | 745.99           | Νερό 0.91<br>CO <sub>2</sub> 0.089<br>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 CO<sub>2</sub> και την γλυκερόλη. Στους υπολογισμούς της ενεργειακής ολοκλήρωσης θα αγνοηθούν.

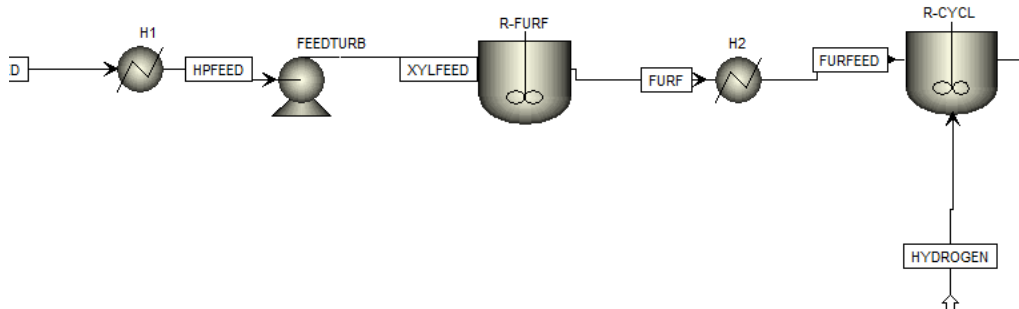
## 2.6 Block 600 - Παραγωγή Κυκλοπεντανόνης με την Φουρφουράλη ως Ενδιάμεσο

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  $232\text{ }^{\circ}\text{C}$  όπως βγήκε από την έκρηξη ατμού και θερμαίνεται μέχρι τους  $243\text{ }^{\circ}\text{C}$  όπου λειτουργεί ο πρώτος αντιδραστήρας (ψυχρό ρεύμα)





Σχήμα 6: Block 600 στο Aspen

- Ψύχεται το προϊόν της πρώτης αντίδρασης για να τροφοδοτηθεί στους 160 °C στον 2ο αντιδραστήρα (θερμό ρεύμα).

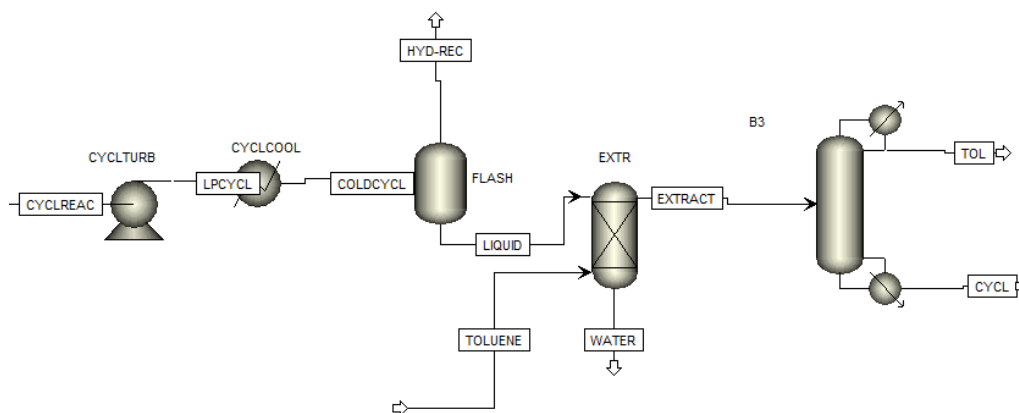
Άρα τα διαθέσιμα ρεύματα είναι

Πίνακας 3: Θερμά και Ψυχρά Ρεύματα στο Block 600

Ρεύμα	Είδος	T <sub>in</sub> (C)	T <sub>out</sub> (C)	Παροχή (kmol/hr)	Σύσταση
XylFeed	Ψυχρό	232	243	26.38	Ξυλόζη
FurFeed	Θερμό	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 <sub>in</sub> (C)	T <sub>out</sub> (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 <sub>in</sub> (C)	T <sub>out</sub> (C)	Παροχή (kmol/hr)	Σύσταση
FeedSteam	Ψυχρό	20	232	633.22	Νερό
Vapors	Θερμό	232	30	905.27	Νερό 0.92 CO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 0.08 Γλυκερόλη 0.02 Άλλα 0.01
FlashVaps	Θερμό	140	30	745.99	Νερό 0.91

Continued on next page

Continued from previous page

Ρεύμα	Είδος	T <sub>in</sub> (C)	T <sub>out</sub> (C)	Παροχή (kmol/hr)	Σύσταση
					CO <sub>2</sub> 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 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 <sub>p</sub> (J/mol K)
Νερό	75.38
Κυτταρίνη	89.63
Λιγνίνη	90.98
Γλυκόζη	225
Γλυκερόλη	225.4
CO <sub>2</sub>	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 <sub>p</sub> (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

Continued on next page

Continued from previous page

Ρεύμα	Παροχή (kmol/h)	Cp (J/mol K)	CP (MJ/h K)
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
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:

## 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 συμπήκνωσης έχουν τα StExpVapors, FlashVaps, GlycWater.

Η θερμότητα εξάτμισης του FeedSteam είναι 21829.6 MJ/hr ενώ του RProd 28921 MJ/hr. Η θερμότητα συμπήκνωσης του StExpVapors είναι 21442 MJ/hr, του FlashVaps 29099 MJ/hr και του GlycWater 418.51 MJ/hr

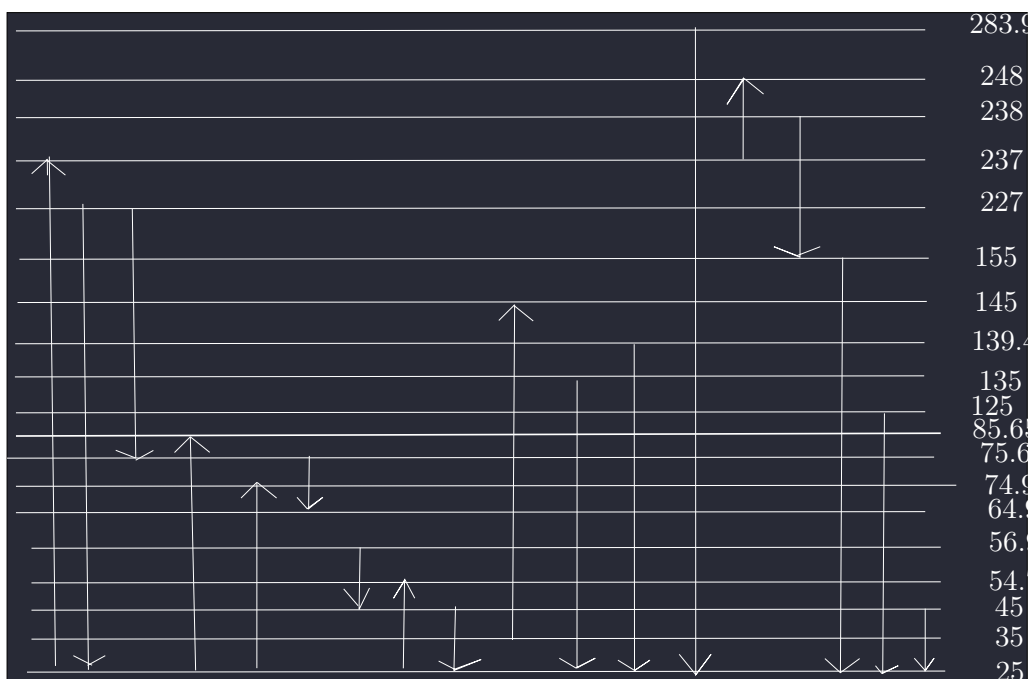
Το FeedSteam εξατμίζεται στους 225 (μπάνει στο ΜΣΓ ως 230) ενώ το GlycWater συμπηκώνεται στους 102 (97 στο ΜΣΓ). Τα άλλα 3 είναι πιο περίπλοκα καθώς δεν αποτελούν καθαρό νερό άρα η λανθάνουσα θερμότητα απορροφάται/εκπέμπεται σε ένα θερμοκρασιακό εύρος.

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 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



Σχήμα 8: Ενεργειακός καταρράκτης της διεργασίας

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

T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	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

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

T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	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

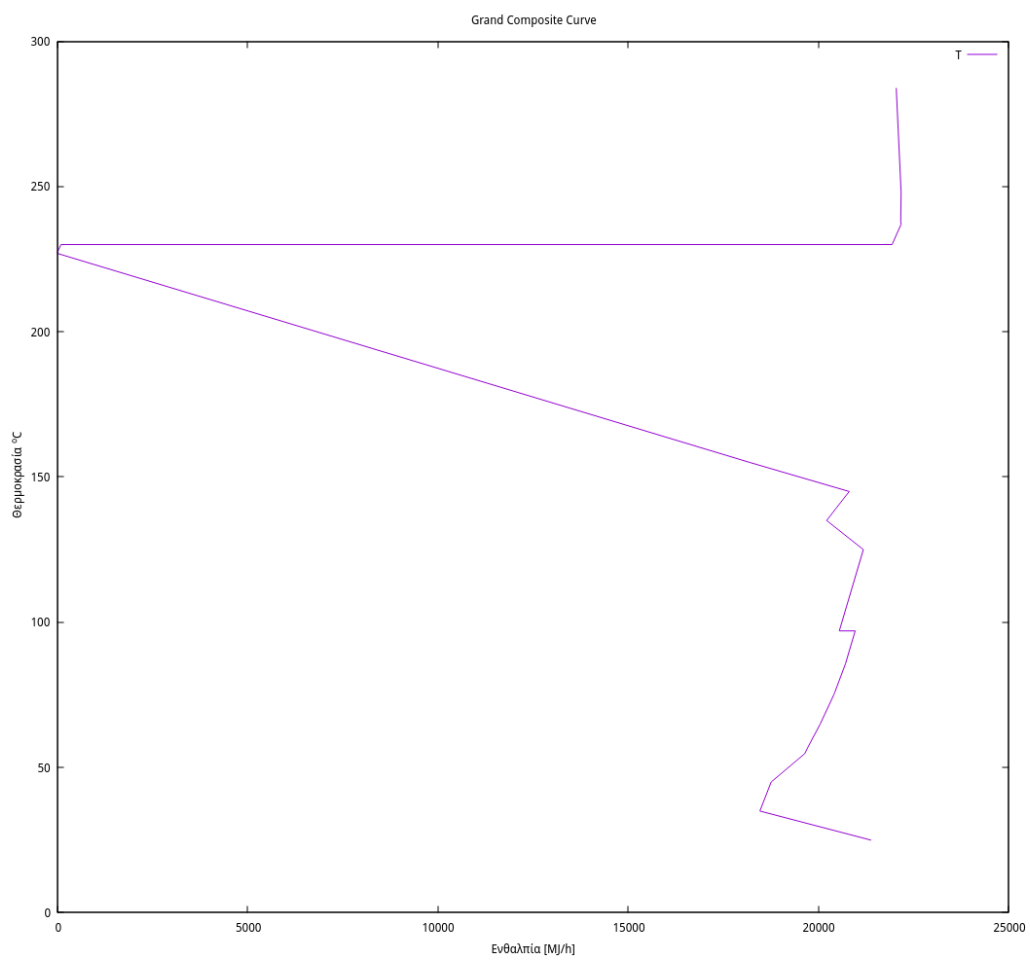
Cumulative Dh	T
22042.425	283.9
22171.091	248
22159.951	238
22169.010	237
21931.525	230.01
101.925	230
0	227
18195	155
20806.8	145
20473.65	139.4
20215.16	135
21178.76	125
20546.47	97.01
20964.3	97
20707.9	85.65
20421.42	75.65
20397.857	74.9
20041.747	64.9
19720.607	56.97
19639.173	54.75
18756.033	45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

Παρατηρούμε πως ο κόμβος ανάσχεσης είναι στους  $227^{\circ}C$  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  $25^{\circ}C$  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.



Σχήμα 9: Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα



#### 4.3.2 Αποστακτική στήλη γλυκερόλης

Ο αναβραστήρας της στήλης λειτουργεί στους  $293\text{ }^{\circ}\text{C}$  στο ΜΣΓ και έχει απαίτηση θερμότητας στους  $1105.44\text{ MJ/hr}$ . Ο συμπηκνωτήρας της στήλης λειτουργεί στους  $145\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $140\text{ }^{\circ}\text{C}$  στο ΜΣΓ) με απαίτηση  $149.46\text{ MJ/hr}$ . 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 ( $13.35\text{ MJ/hr}$ ) 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  $8971.67\text{ MJ/hr}$  ενώ ο αναβραστήρας είναι ένα ψυχρό ρεύμα στους  $130$  ( $135\text{ }^{\circ}\text{C}$  στο ΜΣΓ) με θερμότητα  $9545.79\text{ MJ/hr}$ . 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  $9545.79\text{ MJ/hr}$  στη θερμοκρασία του αναβραστήρα και επιστρέφοντας  $8971.67\text{ MJ/hr}$  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  $393.63\text{ MJ/hr}$  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.

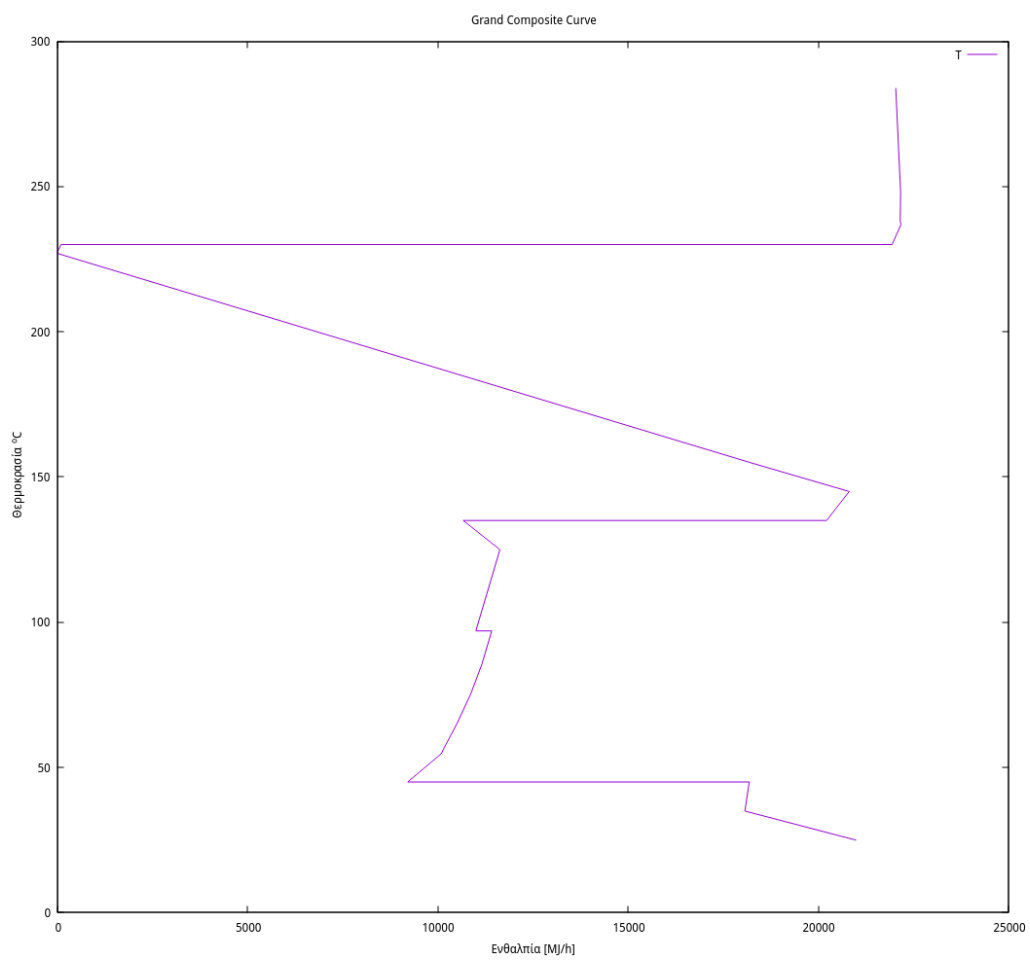
Παρακάτω παρατίθεται και το ΜΣΓ στο οποίο έχουν γίνει οι δύο αυτές προσθήκες.

#### 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,  $11766.8$

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



Σχήμα 10: Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα μετά την ολοκλήρωση 3 διεργασιών

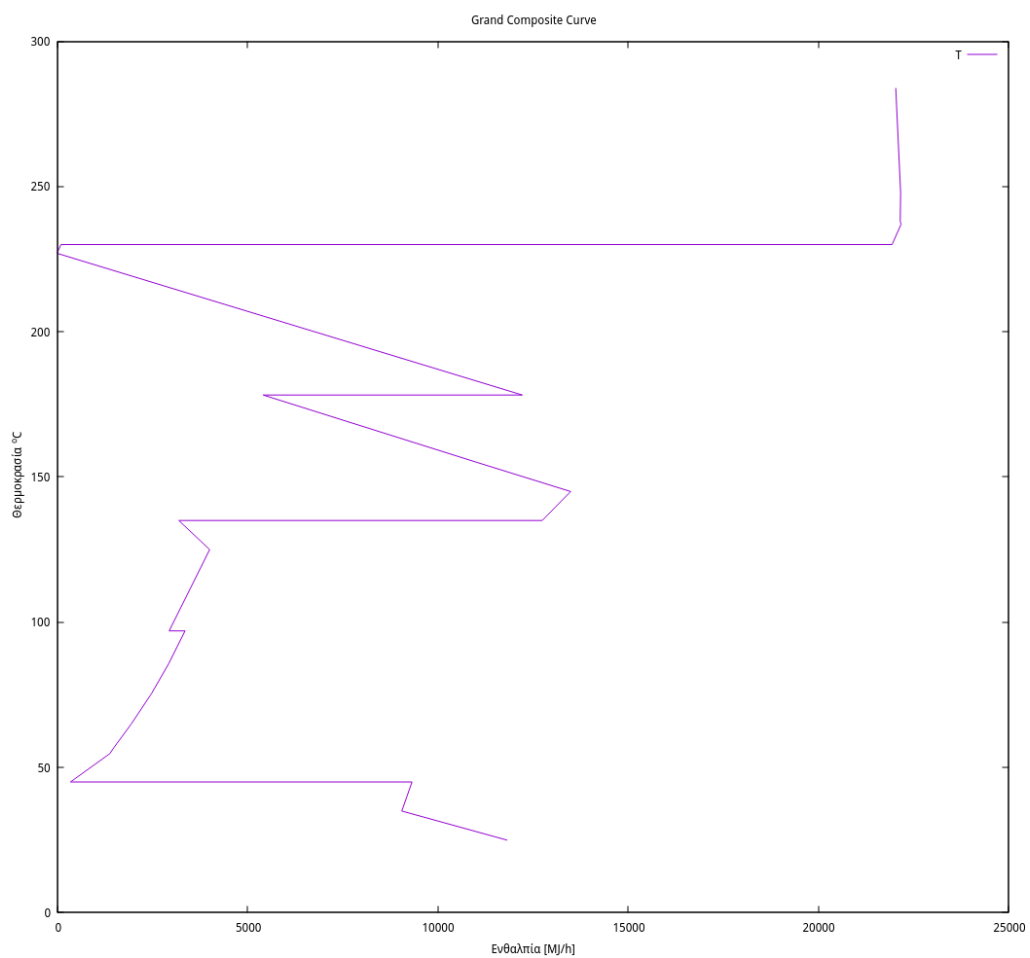
MJ/hr ψυχρή παροχή απαιτείται για ψύξη ρευμάτων σε θερμοκρασίες από 45 °C και κάτω. Τα υπόλοιπα 9210.2 MJ/hr χρησιμοποιούνται για ψύξη ρευμάτων σε θερμοκρασίες από 190 °C έως 227 °C. Το βασικό θερμό ρεύμα στην περιοχή αυτή είναι οι ατμοί της έκρηξης ατμού μετά την διεργασία εκείνη. Είναι ατμός σε πολύ 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



Σχήμα 11: Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα μετά την ενσωμάτωση ατμοπαραγωγής

περιοχή αυτή έχει γίνει πρακτικά αυτόνομη περιοχή λόγω της μεγάλης τσέπης που έχει δημιουργηθεί.

#### 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 ποιό ρεύμα εναλλάσει με ποιό. Αρχικά, αξίζει να δούμε σε έναν πίνακα όλα τα ρεύματα της διεργασίας και ότι θέλουμε να ολοκληρώσουμε.

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.

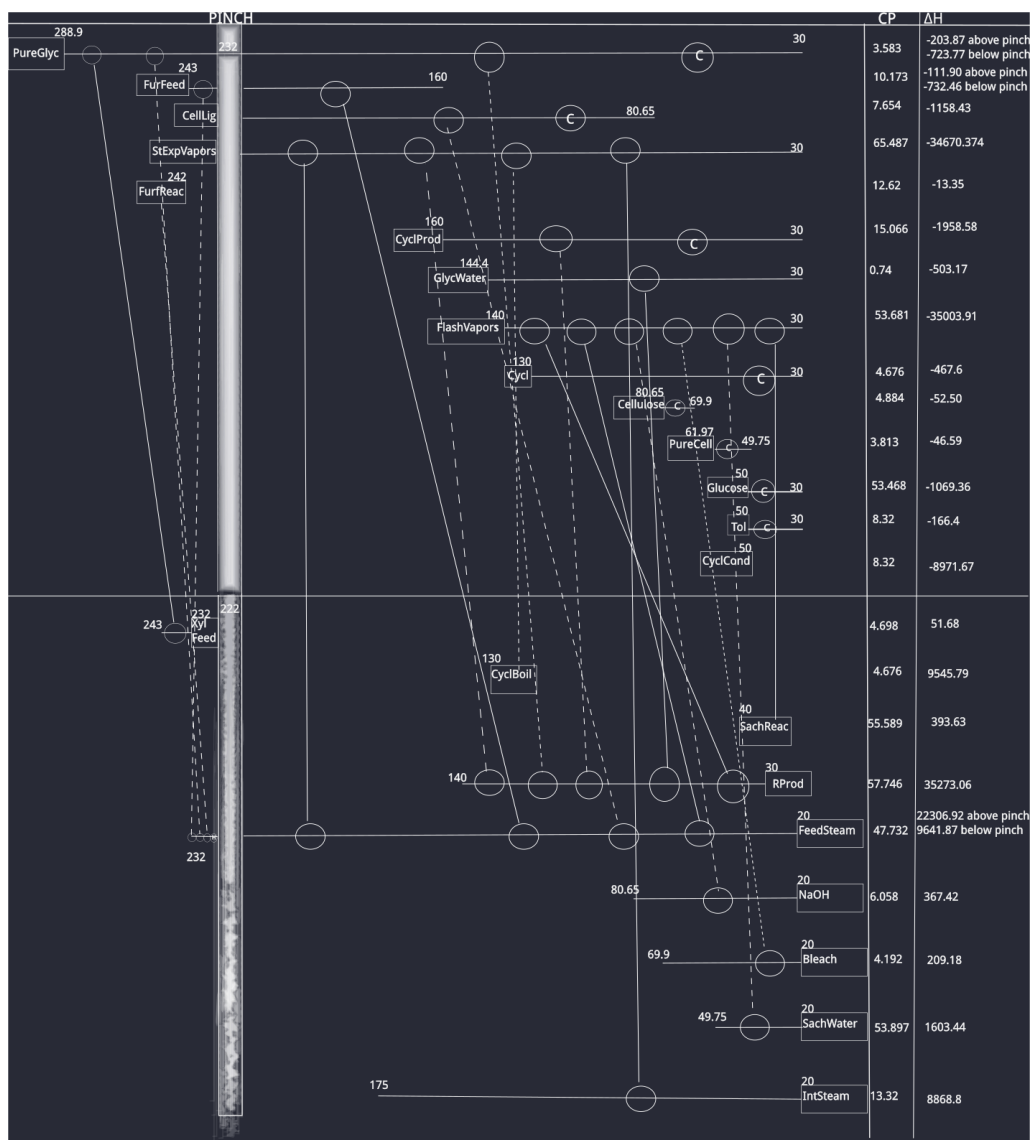
Με βάση τις πληροφορίες αυτές μπορεί να φτιαχτεί το διάγραμμα πλέγματος της διεργασίας πάνω στο οποίο θα βασιστεί και ο σχεδιασμός του δικτύου εναλλαγής θερμότητας. Αξίζει να αναφερθεί πως στο διάγραμμα πλέγματος που παρατίθεται φαίνονται και οι εναλλάκτες που θα χρησιμοποιηθούν. Η διαδικασία με την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

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.

Πίνακας 14: Ρεύματα της διεργασίας

Ρεύμα	Είδος	CP (MJ/h K)	T <sub>in</sub> (C)	T <sub>out</sub> (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



Σχήμα 12: Διάγραμμα Πλέγματος της διεργασίας



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)	$\Delta H_{tot}$ (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).

## 5.2 Δίκτυο εναλλαγής θερμότητας πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης

Πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης έχουμε τα εξής ρεύματα

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

Πίνακας 16: Συγκεντρωτικός πίνακας ρευμάτων με ενθαλπίες

Ρεύμα	Είδος	CP (MJ/h K)	$\Delta H_{tot}$ (MJ/h)
PureGlyc <sub>a</sub>	Θερμό	3.583	-203.8727
PureGlyc <sub>b</sub>	Θερμό	3.583	-723.766
FurFeed <sub>a</sub>	Θερμό	10.173	-111.903
FurFeed <sub>b</sub>	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 <sub>a</sub>	Ψυχρό	47.732	22306.92
FeedSteam <sub>b</sub>	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

Πίνακας 17: Ρεύματα πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης

Ρεύμα	Είδος	CP (MJ/h K)	$\Delta H_{tot}$ (MJ/h)
PureGlyc <sub>a</sub>	Θερμό	3.583	-203.8727
FurFeed <sub>a</sub>	Θερμό	10.173	-111.903
FurfReac	Θερμό	7.436	-13.35
XylFeed	Ψυχρό	4.698	51.678
FeedSteam <sub>a</sub>	Ψυχρό	47.732	22306.92

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.

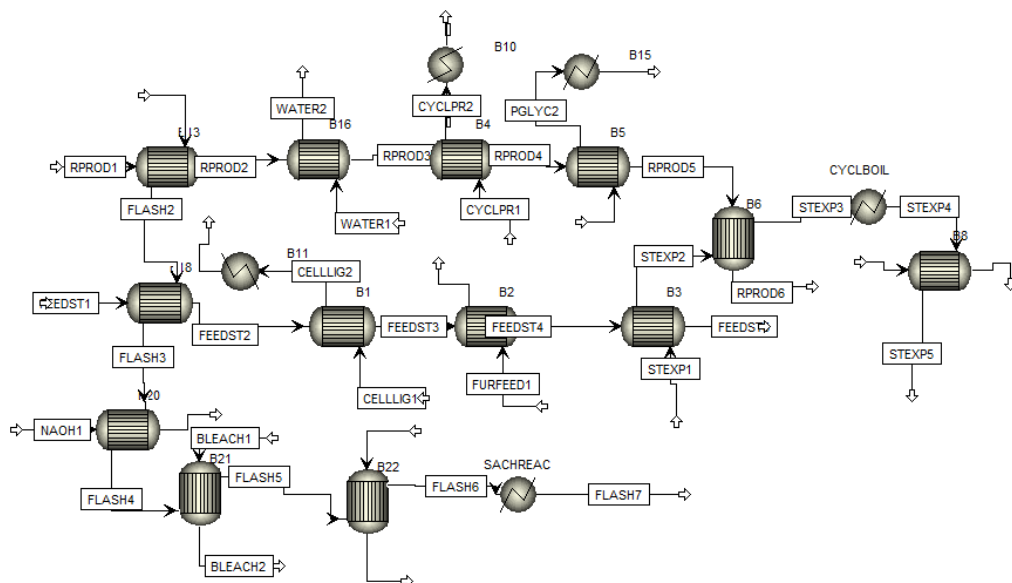
### 5.3 Δίκτυο εναλλαγής θερμότητας κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης

Κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης έχουμε τα εξής ρεύματα.

Πίνακας 18: Ρεύματα κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης

Ρεύμα	Είδος	CP (MJ/h K)	$\Delta H_{tot}$ (MJ/h)
PureGlyc <sub>b</sub>	Θερμό	3.583	-723.766
FurFeed <sub>b</sub>	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 <sub>b</sub>	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 απαίτηση 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  $8.5\text{ bar}$ . 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  $\text{CO}_2$  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  $2500\text{ MJ/hr}$ . Αξίζει να σημειωθεί πως επίσης δεν έχει ολοκληρωθεί ο συμπηκνωτήρας της κυκλοπεντανόνης, ο οποίος έχει σημαντικό θερμικό φορτίο (περίπου  $9000\text{ MJ/hr}$ ). 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.

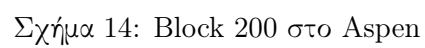
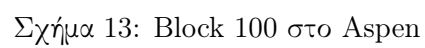
Η ονοματολογία θα βασιστεί σε ένα format A-XYX όπου το A θα είναι ένα γράμμα που παριστάνει τι διεργασία είναι κάτι, το X θα είναι ο αριθμός του block και τα YY θα είναι η αρίθμηση αυτών. Τα γράμματα A θα είναι τα εξής

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.

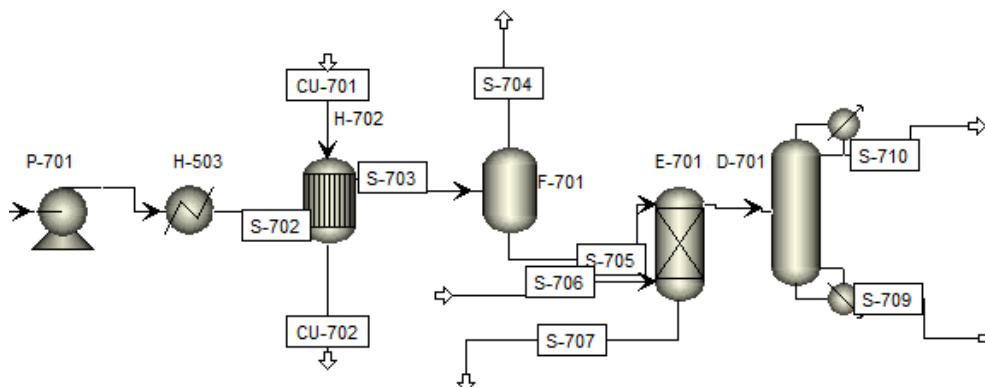
Στο block 100 υπάρχουν το FeedSteam καθώς και το StExh vapors, δύο πολύ σημαντικά ρεύματα που συνεισφέρουν σε πολύ μεγάλο ποσοστό στο τελικό ΔΕΘ. Για αυτό, το αριστερό κομμάτι του block είναι πρακτικά ένα μεγάλο κομμάτι του δικτύου το οποίο βασίζεται στα δύο αυτά ρεύματα.



[illegible]

Σχήμα 16: Block 600 στο Aspen

To block 600 έχει 3 εναλλάκτες οι οποίοι όμως έχουν ήδη συμπεριληφθεί και σε προηγούμενα αρχεία. Βέβαια, για κάποιον λόγο, η προσθήκη του H-105 ως HeatX είναι αδύνατη καθώς βγαίνει error. Ο εναλλάκτης σίγουρα λειτουργεί (και μπορεί κανείς να το δει αυτό στο block 100) αλλά εδώ βγάζει error για αυτό προστέθηκε ως απλός heater.



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. Αυτή έγινε κατά κύριο λόγο με τα εργαλεία οικονομικής ανάλυσης του AspenPlus αλλά σε κάποια σημεία χρησιμοποιήθηκε και το εργαλείο κοστολόγησης της πλατφόρμας IPSEN.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα οικονομικής ανάλυσης για κάθε κομμάτι της διεργασίας (προεπεξεργασία και οι διεργασίες των 3 πλατφόρμων) ξεχωριστά και υπολογίζεται το λειτουργικό κόστος, συνολικό κόστος, έσοδα και λειτουργικό κέρδος του συνολικού έργου. Στις παρακάτω ενότητες αναλύονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τα κόστη και οι πωλήσεις από κάθε διεργασία.

Πίνακας 20: Σύνοψη Αποτελεσμάτων Οικονομικής Ανάλυσης

Blocks	Op. Cost [EUR]	Tot. Cost [EUR]	Profit [EUR/Year]	Op. Profit [EUR]
100-200	7.882.614	19.443.605	0	-19.443.605
300	1.179.297	11.015.036	48.300.000	37.284.964
400-500	855.341	2.605.917	8.663.913	6.057.996
600-700	42.860.430	45.601.350	77.707.938	32.106.587
Total	52.777.682	78.665.908	134.671.851	56.005.942

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα, παρατηρείται ότι οι επενδύσεις που έγιναν στις διεργασίες κλασμάτωσης βιομάζας δεν απέφερε έσοδα από πωλήσεις προϊόντων, με αποτέλεσμα αρνητικά λειτουργικά κέρδη. Η επένδυση στην κλασμάτωση βιομάζας οδήγησε σε λειτουργική ζημία άνω των 19 εκατομμυρίων ευρώ. Η επεξεργασία λιγνίνης που γίνεται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του εργοστασίου, όχι μόνο καλύπτει τις ανάγκες, αλλά παράγει μεγάλη



ποσότητα ηλεκτρισμού που μπορεί να πωληθεί στην αγορά. Για αυτό, η επένδυση σε αυτή τη διεργασία οδήγησε σε πολύ μεγάλο λειτουργικό κέρδος, ύψους 38 εκατομμυρίων ευρώ.

Από την άλλη πλευρά, οι επενδύσεις που έγιναν στην παραγωγή γλυκερόλης και κυκλοπεντανόνης απέφεραν σημαντικά έσοδα από τις πωλήσεις προϊόντων, με αποτέλεσμα να υπάρχουν λειτουργικά κέρδη. Η επένδυση στη παραγωγή γλυκερόλης απέφερε πάνω από 8,6 εκατομμύρια ευρώ σε πωλήσεις προϊόντων και λειτουργικό κέρδος άνω των 6 εκατομμυρίων ευρώ. Παράλληλα, η επένδυση στην παραγωγή κυκλοπεντανόνης απέφερε πάνω από 77 εκατομμύρια ευρώ σε πωλήσεις προϊόντων και λειτουργικό κέρδος άνω των 32,1 εκατομμυρίων ευρώ. Τελικά, η συνολική επένδυση οδήγησε σε λειτουργικό κέρδος 56 εκατομμυρίων ευρώ για τον πρώτο χρόνο λειτουργίας.

Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι το κόστος εξοπλισμού και εγκατάστασης, η τιμή του οποίου ανέρχεται στα 4 εκατομμύρια ευρώ, θα πληρωθεί μόνο μία φορά στην αρχή του έργου, οπότε τα έσοδα από την λειτουργία του εργοστασίου θα είναι μεγαλύτερα το δεύτερο έτος.

## 7.1 Υπολογισμός δείκτη ROI

Για την αξιολόγηση της απόδοσης που θα έχει η επένδυση σε αυτό το έργο, υπολογίστηκε ο δείκτης ROI (Return on Investment) ως εξής:

$$ROI = \frac{\text{Κέρδος Επένδυσης} - \text{Κόστος Επένδυσης}}{\text{Κόστος Επένδυσης}} = 71.19\%$$

Το ROI 71% σημαίνει ότι για κάθε ευρώ που επενδύεται, υπάρχει απόδοση 71 cents (λεπτά του ευρώ). Με άλλα λόγια, η επένδυση απέφερε κέρδος 71% του αρχικού κόστους επένδυσης. Αυτό δείχνει ότι η επένδυση ήταν κερδοφόρα, με πολύ υψηλότερη απόδοση σε σύγκριση με έναν τυπικό λογαριασμό ταμειευτηρίου ή άλλες επενδύσεις χαμηλού κινδύνου.

## 7.2 Blocks 100-200 - Κλασμάτωση της βιομάζας και παραγωγή γλυκόζης

Στη διεργασία αυτή, ως πρώτη ύλη θεωρείται ότι είναι το πυρηνόξυλο, για το οποίο διατίθεται ότι διατίθεται δωρεάν. Η τροφοδοσία εκτός από πυρηνόξυλο περιέχει νερό, με τιμή 0,0005488 \$/kg (0,00050€/kg) και το NaOH που κοστίζει 0,5\$/kg (0,45€/kg). Ο εξοπλισμός καθώς και η εγκατάσταση του για την διεργασία κοστίζει συνολικά 1.471.410 €. Επίσης, το συνολικό ετήσιο κόστος των πρώτων υλών ανέρχεται στα 6.5 εκατομμύρια ευρώ. Η διεργασία αυτή δεν αποφέρει έσοδα καθώς τα προϊόντα χρησιμοποιούνται στις επόμενες διεργασίες και δεν προωθούνται στη αγορά. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται συνοπτικά η κοστολόγηση της διαδικασίας κλασμάτωσης της βιομάζας

Πίνακας 21: Κοστολόγηση εξοπλισμού για την επεξεργασία πυρηνόξυλου  
Summary

Total Capital Cost [EUR]	3.554.946
Total Operating Cost [EUR/Year]	7.882.614
Total Raw Materials Cost [EUR/Year]	6.449.787
Total Product Sales [EUR/Year]	0
Total Utilities Cost [EUR/Year]	84.848
Desired Rate of Return [Percent/'Year]	20
P.O. Period [Year]	0
Equipment Cost [EUR]	265.860
Total Installed Cost [EUR]	1.205.550

Κάθε χρόνο απαιτούνται συνολικά 86 χιλιάδες ευρώ για τις βοηθητικές παροχές. Το κόστος της κάθε βοηθητικής παροχής αναλύεται στον πιο κάτω πίνακα.

Πίνακας 22: Κόστος βοηθητικών παροχών

Utilities					
Name	Fluid	Rate	Rate Units	Cost per Hour	Cost Units
Electricity		52,32	KW	3,649	EUR/H
Cooling Water	Water	0,05425	MMGAL/H	5,859	EUR/H
Steam @400PSI	Steam	0,016212	KLB/H	0,171	EUR/H

Τέλος, παρουσιάζονται πίνακες με την κοστολόγηση κάθε εξοπλισμού της διεργασία και τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού.

Πίνακας 23: Κοστολόγηση Εξοπλισμού

Name	Eq. Cost [EUR]	Inst. Cost [EUR]	Eq. Weight [KG]	Inst. Weight [KG]
H-101	102.330	378.090	13.698	31.956
H-103	16.650	90.000	1.497	8.159
H-108	131.400	442.620	9.480	26.868
H-113	8.460	63.630	254	3.690
O-103	15.210	112.050	1.179	6.365
H-111	34.470	138.960	3.992	16.109
H-105	8.370	69.570	245	5.014
H-109	16.740	88.830	1.497	7.849
H-110	12.510	78.030	862	5.715
H-107	8.190	54.090	213	2.866
H-104	14.490	87.300	1.134	7.711
H-106	9.990	71.820	499	5.347
C-201	126.180	168.210	2.132	4.187
H-201	8.460	63.630	254	3.690
O-101	51.750	189.900	1.950	9.548
H-202	15.210	85.950	1.406	6.858
H-112	10.800	82.800	635	7.115
P-101	43.740	72.630	1.043	2.193
H-102	13.050	84.330	953	7.205
R-201	79.920	217.350	3.946	11.241
E-101	15.210	112.050	1.179	6.365

### 7.3 Block 300 - Combined Heat and Power (CHP) Production

Σε αυτή τη διεργασία όλες οι πρώτες ύλες (λιγνίνη και αέρας) θεωρούνται ότι παρέχονται δωρεάν. Από αυτή τη διεργασία παράγεται ηλεκτρισμός ο οποίος χρησιμοποιείται για να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες σε άλλες διεργασίες της εγκατάστασης.

Πιο συγκεκριμένα, από την καύση της λιγνίνης παράγονται 25 MW ηλεκτρισμού.

Και οι τέσσερις διεργασίες καταναλώνουν συνολικά 689 KW, οπότε θεωρείται ότι παράγονται επιπλέον 24MW οι οποίες μπορούν να πωληθούν και να προσφέρουν επιπλέον κέρδος στο έργο.

Υποθέτοντας ότι το εργοστάσιο βρίσκεται σε λειτουργία 24/7, λειτουργεί 8760 ώρες το χρόνο, συνεπώς,  $24 \text{ MW} \cdot 8760 = 210.240 \text{ MWh}$  και  $\frac{210.240}{1000} = 210.24 \text{ GWh}$

Άρα το κέρδος από την πώληση των 210 GWh ηλεκτρισμού είναι:

$$210GWh \cdot \frac{0.23 \text{ εκατομμύρια ευρώ}}{GWh} = 48.3 \text{ Εκατομμύρια ευρώ}$$

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η κοστολόγηση για την καύση της λιγνίνης.

Πίνακας 24: Σύνοψη κοστολόγησης

Summary

Total Capital Cost [EUR]	7.667.667
Total Operating Cost [EUR/Year]	1.179.297
Total Raw Materials Cost [EUR/Year]	309.000
Total Product Sales [EUR/Year]	48.300.000
Total Utilities Cost [EUR/Year]	305.665
Desired Rate of Return [Percent/Year]	20
P.O. Period [Year]	0
Equipment Cost [EUR]	1.553.407
Total Installed Cost [EUR]	N/A

Πίνακας 25: Κόστος βοηθητικών παροχών

Utilities

Name	Fluid	Rate	Rate Units	Cost per Hour	Cost Units
Electricity		499,92	KW	34,86942	EUR/H

Πίνακας 26: Κοστολόγηση Εξοπλισμού

Name	Eq. Cost [EUR]	Inst. Cost [EUR]	Eq. Weight [KG]	Inst. Weight [KG]
H-304	29.700	N/A	N/A	N/A
T-302	346.500	N/A	N/A	N/A
H-303	12.337	71.622	493,79	2591,57
R-301	468.000	N/A	N/A	N/A
H-301	116.100	N/A	N/A	N/A
T-301	232.200	N/A	N/A	N/A
P-301	348.570	454.320	8.528	16.167

Αξίζει να σημειωθεί πως το Aspen έβγαζε errors κατά την κοστολόγηση του εξοπλισμού αυτού τα οποία δεν κατάφεραν να διορθωθούν, οπότε η κοστολόγηση έγινε από την πλατφόρμα κοστολόγησης του IPSEN.

#### 7.4 Blocks 400-500 - Παραγωγή και καθαρισμός της γλυκερόλης

Έγινε οικονομική αξιολόγηση του ρεύματος προϊόντος, που είναι η γλυκερόλη με καθαρότητα 99,96% σε ποσότητα 12845 tn/year. Βρέθηκε πως η τιμή αγοράς γλυκερόλης σε υψηλή καθαρότητα μπορεί να πουληθεί για 0,34 \$/lb ή 0,732 euro/kg. Επίσης έγινε και διαστασιολόγηση του εξοπλισμού και οικονομική ανάλυση των παροχών που απαιτούνται. Μια σύντομη περιγραφή των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί. Η παρούσα οικονομική ανάλυση ασχολείται με τις διεργασίες που χρησιμοποιούνται από την έξοδο του βιοαντιδραστήρα και μετά, συνεπώς δεν αγοράζεται κάποια πρώτη ύλη.

Πίνακας 27: Σύνοψη κοστολόγησης

Summary	
Total Capital Cost [EUR]	1.562.976
Total Operating Cost [EUR/Year]	855.341
Total Raw Materials Cost [EUR/Year]	0
Total Product Sales [EUR/Year]	8.663.913
Total Utilities Cost [EUR/Year]	31.990
Desired Rate of Return [Percent/'Year]	20
P.O. Period [Year]	0
Equipment Cost [EUR]	16.560
Total Installed Cost [EUR]	139.050

Συνεπώς για την εγκατάσταση αυτού του εξοπλισμού απαιτούνται 155.610 ευρώ, και αφού ξεκινήσει να λειτουργεί αυτή η θα έχει συνολικό ετήσιο κέρδος της τάξεως των 8.663.913 €/y, που σημαίνει ότι η απόσβεση του κόστους εγκατάστασης αυτών των διεργασιών θα γίνει σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Ακολουθούν πίνακες με την κοστολόγηση κάθε εξοπλισμού της διεργασίας, των βοηθητικών παροχών και τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού.

Πίνακας 28: Κόστος βοηθητικών παροχών

Utilities					
Name	Fluid	Rate	Rate Units	Cost per Hour	Cost Units
Electricity		52,32	KW	3,64932	EUR/H

Πίνακας 29: Κοστολόγηση Εξοπλισμού

Name	Eq. Cost [EUR]	Inst. Cost [EUR]	Eq. Weight [KG]	Inst. Weight [KG]
H-505	8.190	69.300	218	4.980
H-506	8.190	62.370	231	3.444
C-501	126.180	168.210	2.132	4.187
H-106	8.370	69.750	245	5.033
H-109	14.850	86.580	1.270	7.574
R-401	79.470	216.720	3.810	11.078
M-401	0	0	0	0
H-502	8.280	66.960	245	4.393
H-501	15.120	93.690	1.406	8.790
D-501	99.180	463.590	8.237	28.601
H-504	7.560	50.670	118	2.300
F-501	23.310	167.400	2.087	11.795
H-503	47.340	149.310	6.123	17.525

## 7.5 Blocks 600-700 - Παραγωγή και καθαρισμός κυκλοπεντανόνης

Σε αυτή τη μονάδα γίνεται παραγωγή 19615 tn/yr κυκλοπεντανόνης με καθαρότητα 98%, η οποία μπορεί να πωληθεί στην αγορά σε τιμή 5 \$/kg (4,5€/kg). Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή κυκλοπεντανόνης είναι η ξυλόζη, η οποία θεωρήθηκε δωρεάν επειδή είναι προϊόν από την επεξεργασία της βιομάζας, το νερό για το οποίο ορίστηκε η τιμή 0,0005488 \$/kg (0,00049€/kg) και το υδρογόνο, το οποίο κοστίζει 2 \$/kg (1.8€/kg).

Όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα, η εγκατάσταση του εξοπλισμού θα κοστίσει 638.730 ευρώ και μόλις τεθεί σε λειτουργία, αναμένεται να αποφέρει ετήσιο κέρδος 86.467.050 €. Συνεπώς, το κέρδος από τη διεργασία αυτή είναι αρκετά μεγάλο.

Πίνακας 30: Σύνοψη κοστολόγησης

Summary

Total Capital Cost [EUR]	2.050.587
Total Operating Cost [EUR/Year]	42.860.430
Total Raw Materials Cost [EUR/Year]	38.856.780
Total Product Sales [EUR/Year]	86.467.050
Total Utilities Cost [EUR/Year]	51.603
Desired Rate of Return [Percent/'Year]	20
P.O. Period [Year]	1,17
Equipment Cost [EUR]	232.200
Total Installed Cost [EUR]	406.530

Ακολουθούν πίνακες με την κοστολόγηση του εξοπλισμού και των βοηθητικών παροχών, και τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού.

Πίνακας 31: Κόστος βοηθητικών παροχών

Utilities

Name	Fluid	Rate	Rate Units	Cost per Hour	Cost Units
Electricity		84,398	KW	5,8867605	EUR/H

Πίνακας 32: Κοστολόγηση Εξοπλισμού

Name	Eq. Cost [EUR]	Inst. Cost [EUR]	Eq. Weight [KG]	Inst. Weight [KG]
H-702	19.890	94.590	2.087	8.353
D-701	292.140	817.200	32.504	70.138
E-701	30.330	78.210	1.678	3.313
T-601	4.500	33.120	132	1.775
H-105	31.230	75.690	2.540	5.090
F-701	17.190	109.350	1.361	5.548
H-503	64.800	114.120	9.480	12.993
H-505	8.190	61.560	213	3.925
R-602	201.960	362.070	18.461	28.585
R-601	44.010	173.610	1.542	8.214
P-601	105.840	138.510	2.585	4.227
H-103	20.790	106.110	2.132	11.115
P-701	5.130	33.570	132	1.739