

Ενεργειακή ολοκλήρωση και Κοστολόγηση

Vidianos Giannitsis

April 1, 2023

Contents

| | | |
|----------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | Εισαγωγή | 1 |
| 2 | Αναγνώριση θερμών και ψυχρών ρευμάτων | 1 |
| 2.1 | Block 100 - Διαχωρισμός των τριών κομματιών της βιομάζας | 2 |
| 2.2 | Block 200 - Παραγωγή Γλυκόζης | 3 |
| 2.3 | Block 300 - Λέβητας Καύσης Λιγνίνης | 4 |
| 2.4 | Block 400 - Παραγωγή Γλυκερόλης | 5 |
| 2.5 | Block 500 - Καθαρισμός Γλυκερόλης | 5 |
| 2.6 | Block 600 - Παραγωγή Κυκλοπεντανόνης με την Φουρφουράλη ως Ενδιάμεσο | 6 |
| 2.7 | Block 700 - Καθαρισμός της Κυκλοπεντανόνης | 7 |
| 2.8 | Τελική εικόνα | 8 |
| 3 | Υπολογισμοί Ενεργειακής Ολοκλήρωσης | 10 |
| 3.1 | Εναλλακτικά σενάρια ολοκλήρωσης | 11 |
| 3.2 | Συμπεράσματα | 14 |
| 3.2.1 | Σχόλια για την ολοκλήρωση διάφορων κομματιών | 14 |
| 3.2.2 | Αλλαγές στο ΜΣΓ | 18 |
| 3.2.3 | Απαίτηση σε θερμές παροχές | 20 |
| 4 | Κοστολόγηση | 21 |
| 4.1 | Προεπεξεργασία (Blocks 100-200) | 21 |
| 4.2 | Κύκλο Rankine (Block 300) | 21 |
| 4.3 | Παραγωγή και Καθαρισμός Γλυκερόλης (Blocks 400-500) | 21 |
| 4.4 | Παραγωγή και Καθαρισμός Κυκλοπεντανόνης (Blocks 600-700) | 25 |

1 Εισαγωγή

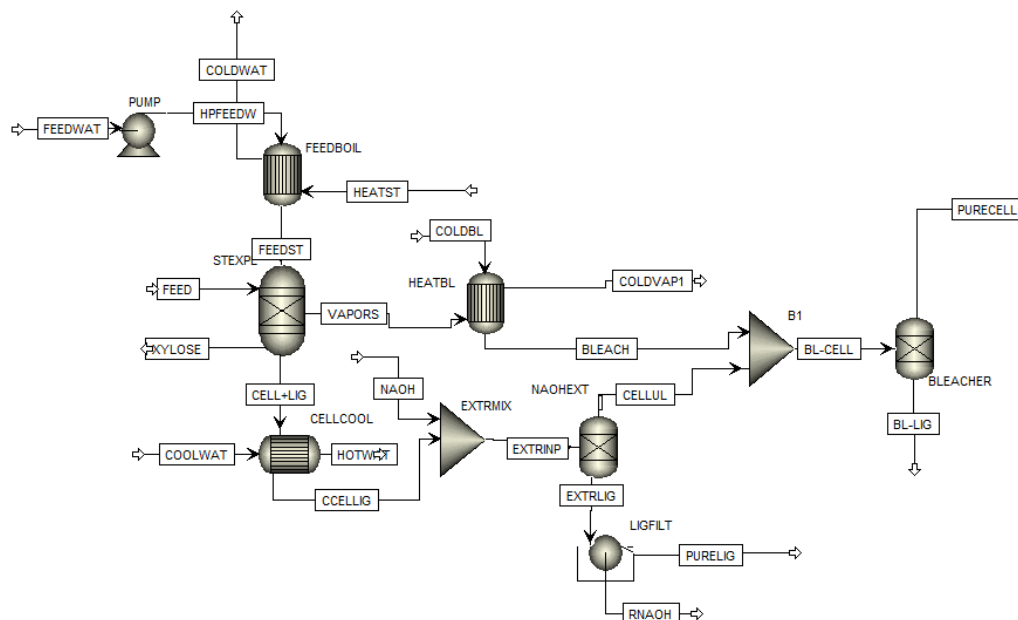
Στην πρόοδο αυτή εξετάστηκε η ενεργειακή ολοκλήρωση των ρευμάτων και διεργασιών που υπάρχουν, με σκοπό την ελαχιστοποίηση θερμών και ψυχρών παροχών που απαιτούνται. Επίσης, εξετάστηκε και μία πρώτη εικόνα της κοστολόγησης, η οποία βέβαια θα ολοκληρωθεί για την τελική πρόοδο.

2 Αναγνώριση θερμών και ψυχρών ρευμάτων

Για να γίνει η ενεργειακή ολοκλήρωση, πρέπει πρώτα να αναγνωριστούν όλα τα θερμά και ψυχρά ρεύματα της διεργασίας. Αυτή η διαδικασία γίνεται παρακάτω.

2.1 Block 100 - Διαχωρισμός των τριών κομματιών 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.



Σχήμα 1: Block 100 στο Aspen

Στο block αυτό, έχουμε τα εξής.

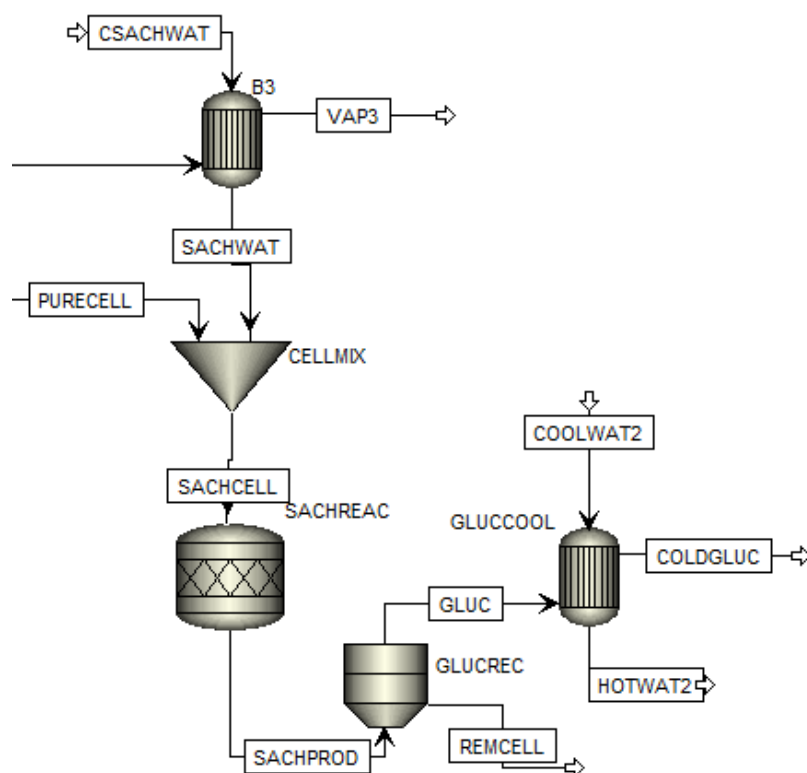
- Ατμός της τροφοδοσίας ο οποίος θερμαίνεται από θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι $232\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ψυχρό ρεύμα). Το ρεύμα με το οποίο εναλλάσσει θερμότητα είναι βοηθητική παροχή της διεργασίας. Κάποια από την θερμότητα του προσφέρεται για την θέρμανση και διάσπαση του πυρηνόξυλου, ενώ ο υπόλοιπος ατμός, μαζί με τα υπόλοιπα ατμώδη υπολείμματα της έκρηξης (κυρίως 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 _{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 |

2.2 Block 200 - Παραγωγή Γλυκόζης

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

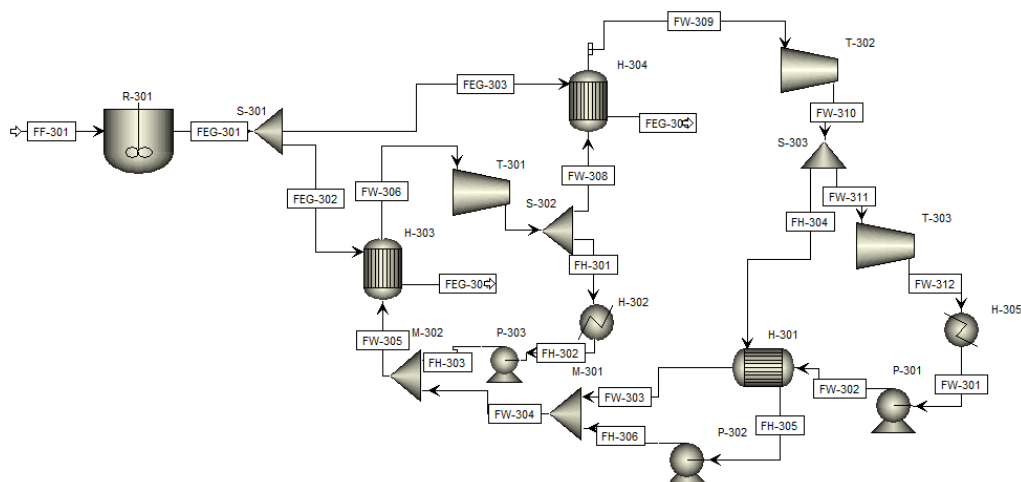
Στο block αυτό:

- 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 | $T_{in}\text{ (C)}$ | $T_{out}\text{ (C)}$ | 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. Η λιγνίνη καίγεται και από τα καυσαέρια της παράγεται ατμός υψηλής πίεσης τον οποίο μπορούμε να εκμεταλλευτούμε σε άλλα σημεία της εγκατάστασης. Νερό αντλείται από χαμηλή πίεση μέχρι τα 40 bar η οποία είναι η πίεση λειτουργίας του λέβητα αυτού. 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 στο αρχείο αυτό δεν έχουν αναφερθεί 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.

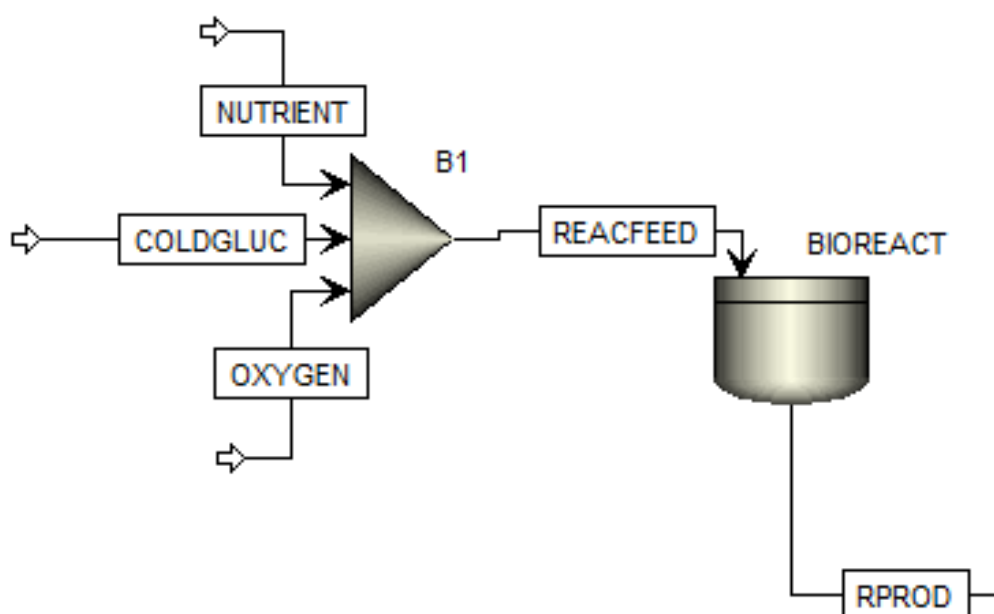


Σχήμα 3: Block 300 στο Aspen

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 FH-301 του διαγράμματος αυτού, η οποία είναι ατμός στα 40 bar και 364.8 °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

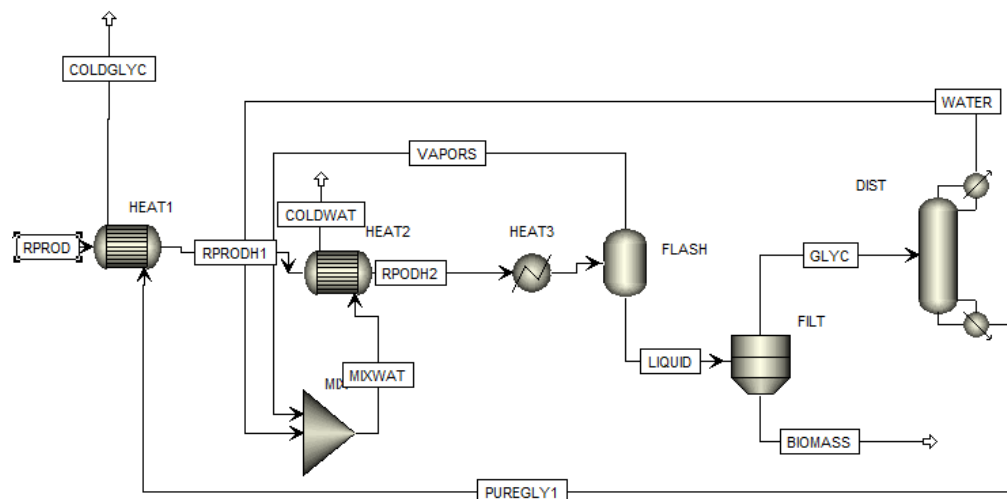
Στο block αυτό, όλα τα ρεύματα τροφοδοτούνται στους 30 °C και αντιδρούν σε αν-τιδραστήρα σταθερής θερμοκρασίας. Άρα, δεν υπάρχει καμία μεταβολή στην θερμοκρασία των ρευμάτων και άρα κανένα θερμό ή ψυχρό ρεύμα να χρησιμοποιηθεί.

2.5 Block 500 - Καθαρισμός Γλυκερόλης

Το block αυτό είναι για τον διαχωρισμό των προϊόντων του βιοαντιδραστήρα και την ανάχ-τηση της καθαρής εμπορεύσιμης γλυκερόλης. Τροφοδοσία του είναι το προϊόν του block 400, δηλαδή τα προϊόντα του βιοαντιδραστήρα μετά την πρώτη βαθμίδα θέρμανσης από την γλυκ-ερόλη. 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).



Σχήμα 5: Block 500 στο Aspen

- 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

| 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 |

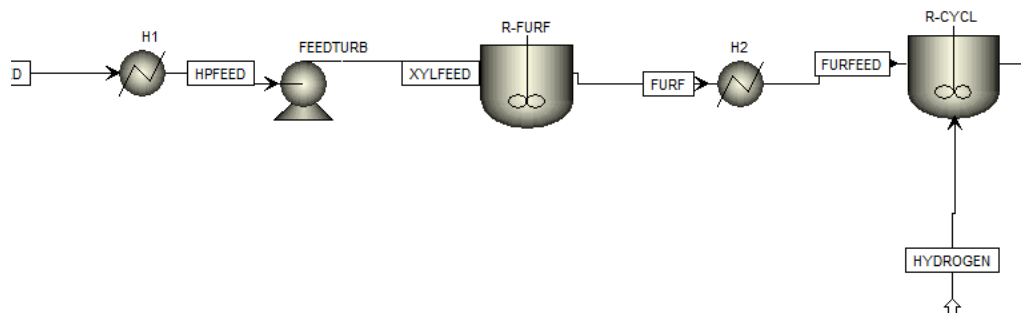
Αξίζει να αναφερθεί πως ο χαρακτηρισμός άλλα αναφέρεται σε περίσσεια αντιδρώντων (ουρία, οξυγόνο), την παραγόμενη βιομάζα και τα παραπροϊόντα της αντίδρασης (οξικό οξύ και αιθανόλη) τα οποία είναι σε αρκετά μικρές ποσότητες συγκριτικά με το νερό, το CO₂ και την γλυκερόλη. Στους υπολογισμούς της ενεργειακής 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 ξυλόζη ενώ αυτή οδηγείται σε έναν δεύτερο αντιδραστήρα, όπου με προσθήκη υδρογόνου, 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)



Σχήμα 6: Block 600 στο Aspen

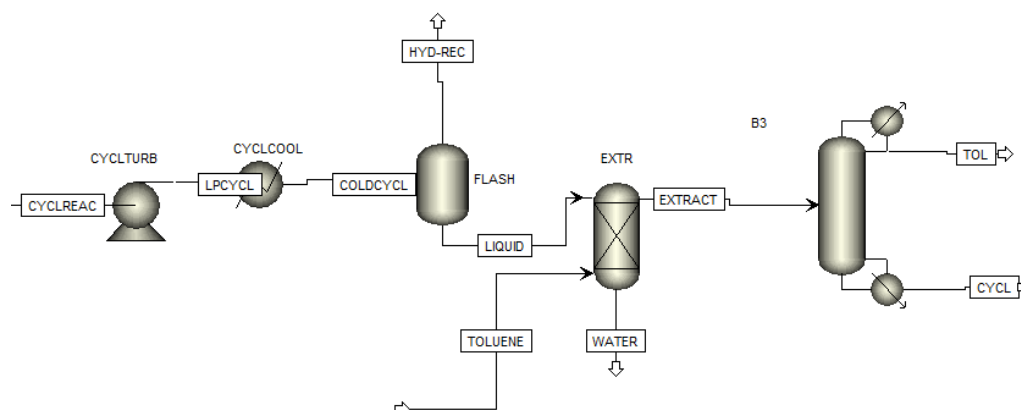
- Ψύχεται το προϊόν της πρώτης αντίδρασης για να τροφοδοτηθεί στους 160 °C στον 2ο αντιδραστήρα (θερμό ρεύμα).
Άρα τα διαθέσιμα ρεύματα είναι

Πίνακας 3: Θερμά και Ψυχρά Ρεύματα στο Block 600

| Ρεύμα | Είδος | T _{in} (C) | T _{out} (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.



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 |

2.8 Τελική εικόνα

Έχοντας δει όλα τα blocks ξεχωριστά, μπορούμε να φτιάξουμε τον συνολικό πίνακα ψυχρών και θερμών ρευμάτων ο οποίος είναι

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 |

Continued on next page

Continued from previous page

| Ρεύμα | Είδος | T _{in} (C) | T _{out} (C) | Παροχή (kmol/hr) | Σύσταση |
|--------------|-------|---------------------|----------------------|------------------|-------------------------------------------------------------|
| 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 |

Με αυτά τα δεδομένα μπορούν να υπολογιστούν οι ειδικές θερμοχωρητικότητες για όλα τα ρεύματα και έπειτα και οι θερμοχωρητικότητες. Αρχικά, παρατίθεται ένας πίνακας με την θερμοχωρητικότητα κάθε ουσίας που μας ενδιαφέρει

Πίνακας 6: Θερμοχωρητικότητες ουσιών

| Ουσία | Cp (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) | Cp (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 |

Continued on next page

Continued from previous page

| Ρεύμα | Παροχή (kmol/h) | Cp (J/mol K) | CP (MJ/h K) |
|-------------|-----------------|--------------|-------------|
| 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, μπορεί να κατασκευαστεί και ο πίνακας των ανηγμένων θερμοκρασιών του συστήματος

Με βάση τους δύο αυτούς πίνακες μπορεί να γίνει η ενεργειακή ολοκλήρωση

3 Υπολογισμοί Ενεργειακής Ολοκλήρωσης

Αρχικά, φτιάχνουμε τον χρήσιμο αυτό πίνακα.

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 | 227 | 10 | 47.732 | 13.757 | 33.975 | 339.75 |
| 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 | 85.65 | 39.35 | 105.479 | 150.889 | -45.41 | -1786.8835 |
| 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 |

ο οποίος θα είναι και το κύριο εργαλείο που θα χρησιμοποιήσουμε για την ολοκλήρωση.

Με βάση αυτό, μπορεί να φτιαχθεί και το μεγάλο σύνθετο γράφημα.

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 προκύπτει ο πίνακας

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 |

Πίνακας 10: Δεδομένα για τον ενεργειακό καταρράκτη

| Cumulative Dh | T |
|---------------|-------|
| 213.165 | 283.9 |
| 341.831 | 248 |
| 330.691 | 238 |
| 339.750 | 237 |
| 0 | 227 |
| 2561.976 | 155 |
| 3002.576 | 145 |
| 2925.928 | 139.4 |
| 2868.962 | 135 |
| 3426.962 | 125 |
| 5213.845 | 85.65 |
| 5607.365 | 75.65 |
| 5634.802 | 74.9 |
| 5958.692 | 64.9 |
| 6176.790 | 56.97 |
| 6246.316 | 54.75 |
| 6026.171 | 45 |
| 6410.131 | 35 |
| 7371.561 | 25 |

Με τα ρεύματα αυτά ως έχουν, προκύπτει ότι απαιτείται μία μεγάλη ποσότητα ψυχρής παροχής και μικρή ποσότητα θερμής. Αυτό είναι ανεπιθύμητο επειδή η μονάδα έχει διαθέσιμη θερμή παροχή δωρεάν ενώ το ίδιο δεν ισχύει για την ψυχρή παροχή. Βέβαια, πολύ από αυτήν την απαίτηση οφείλεται στην εκμετάλλευση του θερμικού περιεχομένου των προϊόντων τα οποία δεν είναι ανάγκη να ψυχθούν και τα εκμεταλλευόμαστε μόνο αν βοηθάνε.

3.1 Εναλλακτικά σενάρια ολοκλήρωσης

Τα δύο σημαντικότερα θερμά ρεύματα που συνεισφέρουν σε αυτό το ανεπιθύμητο αποτέλεσμα είναι οι ατμοί της έκρηξης ατμού (οι οποίοι είναι σε πολύ υψηλή θερμοκρασία και είναι αρκετά μεγάλη ποσότητα) και οι ατμοί του flash στον καθαρισμό της γλυκερόλης που είναι επίσης μεγάλη ποσότητα νερού στην ατμώδη φάση. Αν δεν χρησιμοποιηθεί τίποτα από τα δύο, το

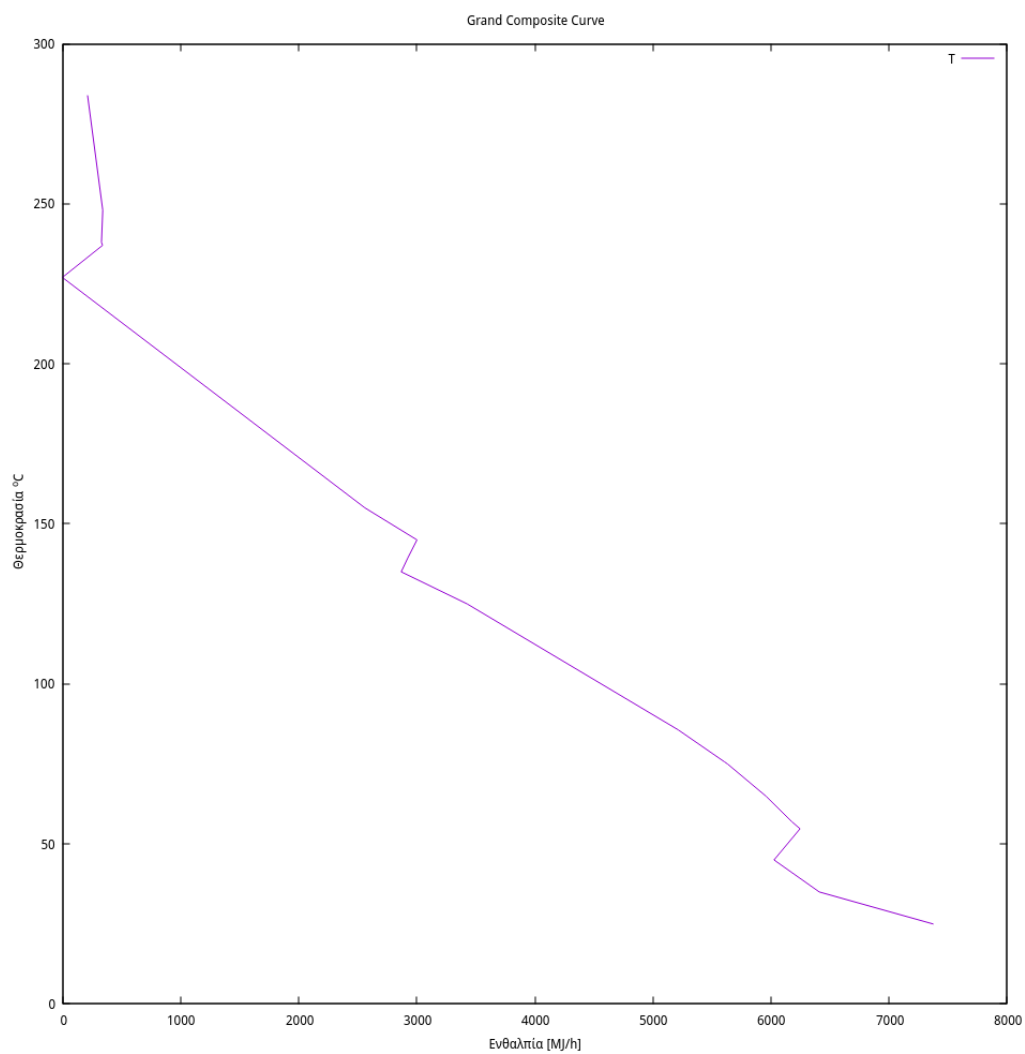
| Continued from previous page | |
|------------------------------|-------|
| Cumulative Dh | T |
| 3352.640 | 139.4 |
| 3007.530 | 135 |
| 2910.660 | 125 |
| 2120.630 | 85.65 |
| 1859.280 | 75.65 |
| 1837.601 | 74.9 |
| 1506.621 | 64.9 |
| 1205.408 | 56.97 |
| 1129.553 | 54.75 |
| 270.91 | 45 |
| 0 | 35 |
| 306.56 | 25 |

Το ΜΣΓ της περίπτωσης αυτής φαίνεται στην επόμενη σελίδα.

Με βάση το αποτέλεσμα αυτό, θεωρείται ότι υπάρχει περιθώριο να εκμεταλλευτούμε το θερμό ρεύμα που παραλείψαμε (καθώς υπάρχει μία σχετικά μεγάλη απαίτηση σε θερμό), αλλά δεν υπάρχει λόγος να ψυχθεί αυτό μέχρι χαμηλή θερμοκρασία επειδή όσο περισσότερο ψύχεται, τόσο περισσότερη ψυχρή παροχή θα θέλουμε. Από τους παραπάνω υπολογισμούς, βλέπουμε ότι η συνολική θερμοχωρητικότητα των θερμών είναι χαμηλή μέχρι τους 135 °C και μετά, που αρχίζουν να ψύχονται οι ατμοί του flash από τον καθαρισμό της γλυκερόλης, οι οποίοι έχουν υψηλή θερμοχωρητικότητα, υπάρχει αρκετή θερμή παροχή. Άρα, είναι αρκετά πιθανό η ψύξη των ατμών του steam explosion μέχρι τους 135 °C στο ΜΣΓ (δηλαδή 140 °C) να είναι βοηθητική, μειώνοντας σημαντικά την απαίτηση σε θερμή παροχή χωρίς να αυξάνει πολύ την απαίτηση σε ψυχρή βοηθητική παροχή.

Πίνακας 13: Καταρράκτης με μερική ψύξη των ατμών του steam explosion

| 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 | 227 | 10 | 47.732 | 13.757 | 33.975 | 339.75 |
| 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 | 95.792 | 9.687 | 96.87 |
| 125 | 85.65 | 39.35 | 105.479 | 85.402 | 20.077 | 790.02995 |
| 85.65 | 75.65 | 10. | 111.537 | 85.402 | 26.135 | 261.35 |
| 75.65 | 74.9 | 0.75 | 111.537 | 82.632 | 28.905 | 21.67875 |
| 74.9 | 64.9 | 10. | 115.730 | 82.632 | 33.098 | 330.98 |
| 64.9 | 56.97 | 7.93 | 115.730 | 77.746 | 37.984 | 301.21312 |
| 56.97 | 54.75 | 2.22 | 115.730 | 81.561 | 34.169 | 75.85518 |
| 54.75 | 45 | 9.75 | 169.627 | 81.561 | 88.066 | 858.6435 |
| 45 | 35 | 10 | 169.627 | 142.536 | 27.091 | 270.91 |
| 35 | 25 | 10 | 111.880 | 142.536 | -30.656 | -306.56 |



Σχήμα 8: Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα

Πίνακας 11: Καταρράκτης χωρίς steam explosion vapors

| 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 | 227 | 10 | 47.732 | 13.757 | 33.975 | 339.75 |
| 227 | 155 | 72 | 47.732 | 17.828 | 29.904 | 2153.088 |
| 155 | 145 | 10 | 47.732 | 26.305 | 21.427 | 214.27 |
| 145 | 139.4 | 5.6 | 105.479 | 26.305 | 79.174 | 443.3744 |
| 139.4 | 135 | 4.4 | 105.479 | 27.045 | 78.434 | 345.1096 |
| 135 | 125 | 10 | 105.479 | 95.792 | 9.687 | 96.87 |
| 125 | 85.65 | 39.35 | 105.479 | 85.402 | 20.077 | 790.02995 |
| 85.65 | 75.65 | 10. | 111.537 | 85.402 | 26.135 | 261.35 |
| 75.65 | 74.9 | 0.75 | 111.537 | 82.632 | 28.905 | 21.67875 |
| 74.9 | 64.9 | 10. | 115.730 | 82.632 | 33.098 | 330.98 |
| 64.9 | 56.97 | 7.93 | 115.730 | 77.746 | 37.984 | 301.21312 |
| 56.97 | 54.75 | 2.22 | 115.730 | 81.561 | 34.169 | 75.85518 |
| 54.75 | 45 | 9.75 | 169.627 | 81.561 | 88.066 | 858.6435 |
| 45 | 35 | 10 | 169.627 | 142.536 | 27.091 | 270.91 |
| 35 | 25 | 10 | 111.880 | 142.536 | -30.656 | -306.56 |

3.2 Συμπεράσματα

Συμπέρασμα ότι με την ενεργειακή ολοκλήρωση αυτή, η οποία θεωρείται και η καλύτερη, οι ενεργειακές απαιτήσεις της διεργασίας γίνονται

Απαίτηση σε ψυχρή παροχή 306.56 MJ/h σε θερμοκρασία κάτω από 25 °C στο ΜΣΓ (δηλαδή κάτω από 20 °C, άρα στους 15 °C πχ).

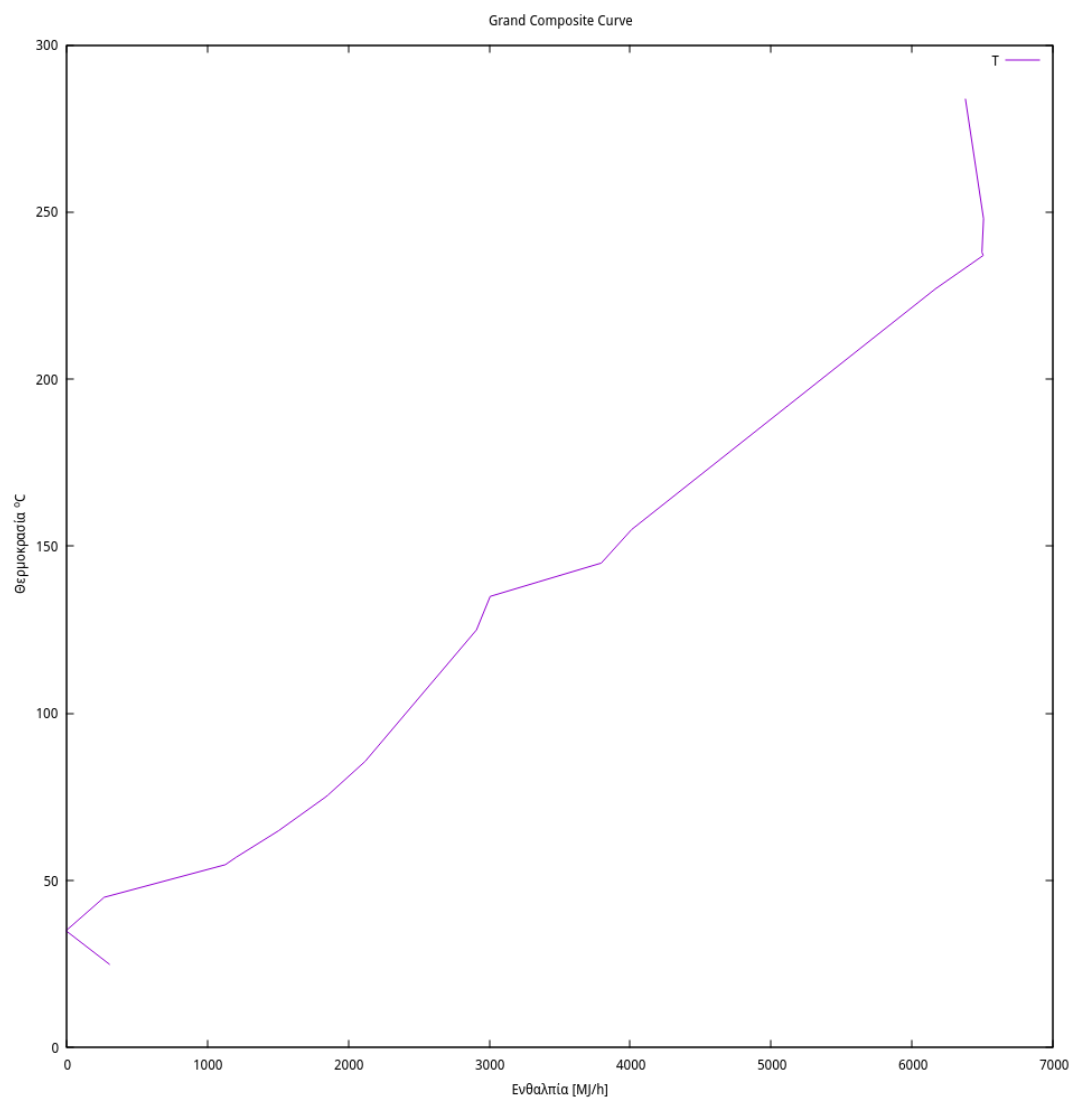
Απαίτηση σε θερμή παροχή: 351.73 MJ/h. Αν εκμεταλλευτούμε την μικρή τσέπη που δημιουργείται στο πάνω μέρος του ΜΣΓ, τότε η θερμή παροχή πρέπει να διατίθεται τουλάχιστον στους 235 °C σε αυτό (δηλαδή τουλάχιστον 240 °C αν χρησιμοποιούμε την πραγματική θερμοκρασία), αλλιώς πρέπει να διατίθεται στους 284 °C τουλάχιστον.

Επίσης, πέρα από αυτήν την ενεργειακή τσέπη η οποία έχει δημιουργηθεί και επιτρέπει ο ατμός που παράγεται να είναι σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη, υπάρχει και άλλη μία, η οποία είναι πάρα πολύ σημαντικής έκτασης και επιτρέπει την πλήρη ενεργειακή αυτονομία όλων των ρευμάτων από 227 °C μέχρι λίγο πάνω από 45 °C.

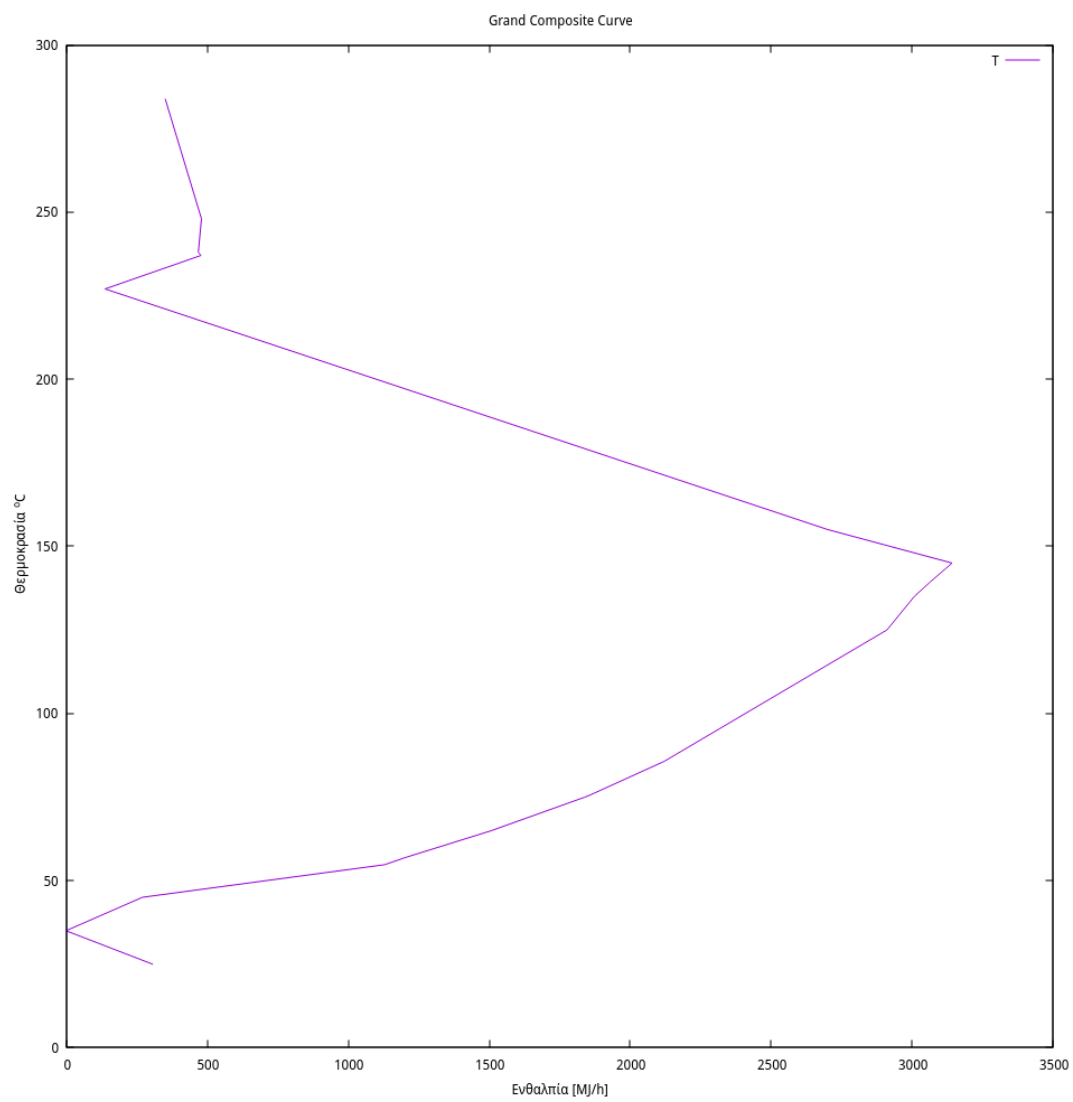
Επίσης, αξίζει να σημειωθεί πως ο κόμβος ανάσχεσης είναι το δεύτερο σημείο του γραφήματος με το πρώτο να είναι πολύ μικρό. Άρα, οι περιοχές μέσα και κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης είναι πολύ μικρές. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα εάν θέλουμε να ολοκληρώσουμε μία αντλία θερμότητας (μέσα από τον κόμβο ανάσχεσης) ή έναν ενδόθερμο αντιδραστήρα (κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης).

3.2.1 Σχόλια για την ολοκλήρωση διάφορων κομματιών

1. Αντιδραστήρας παραγωγής γλυκερόλης Ο αντιδραστήρας λειτουργεί στους 30 βαθμούς κελσίου και είναι εξώθερμος. Στο μεγάλο σύνθετο γράφημα θα έμπαινε στους 25 °C το οποίο είναι κάτω από τον κόμβο ανάσχεσης κατά 10. 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 (όπου θα έπρεπε η θερμοκρασία λειτουργίας να αυξηθεί κατά 10 τουλάχιστον βαθμούς).



Σχήμα 9: Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα χωρίς τους ατμούς της έκρηξης ατμού



Σχήμα 10: Μεγάλο Σύνθετο Γράφημα με μερική ψύξη των ατμών της έκρηξης ατμού

Πίνακας 14: Δεδομένα για τον ενεργειακό καταρράκτη

| Cumulative Dh | T |
|---------------|-------|
| 351.734 | 283.9 |
| 480.399 | 248 |
| 469.259 | 238 |
| 478.318 | 237 |
| 138.568 | 227 |
| 2700.544 | 155 |
| 3141.144 | 145 |
| 3064.497 | 139.4 |
| 3007.530 | 135 |
| 2910.660 | 125 |
| 2120.630 | 85.65 |
| 1859.280 | 75.65 |
| 1837.601 | 74.9 |
| 1506.621 | 64.9 |
| 1205.408 | 56.97 |
| 1129.553 | 54.75 |
| 270.91 | 45 |
| 0 | 35 |
| 306.56 | 25 |

Ακόμη όμως και να γινόταν, η απαίτηση σε ψύξη είναι υψηλή (12901.5 MJ/hr) και με την υπάρχουσα διεργασία και ολοκλήρωση, δεν περισσεύει πουθενά τόση ψυχρή παροχή.

2. Αποστακτική στήλη γλυκερόλης Ο αναβραστήρας της στήλης λειτουργεί στους 293 °C στο ΜΣΓ και έχει απαίτηση θερμότητας στους 1105.44 MJ/hr. Αυτό υπερβαίνει τις θερμοκρασίες καθώς και τις ενθαλπίες που υπάρχουν στο διάγραμμα. Άρα, η ολοκλήρωση όλης της στήλης με το υπόλοιπο διάγραμμα ροής είναι ανέφικτη. Όμως, ο συμπηκνωτήρας της στήλης λειτουργεί στους 145 °C (140 °C στο ΜΣΓ). Στο σημείο αυτό είναι η μεγάλη ενεργειακή τσέπη του ΜΣΓ, άρα η ολοκλήρωση είναι αρκετά εύκολη. Επίσης, η απαίτηση σε ψύξη είναι σχετικά μικρή (149.49 MJ/hr) άρα ο συμπηκνωτήρας αυτός θα μπορούσε να ολοκληρωθεί ως εναλλάκτης αλλά όχι ως ολόκληρη αποστακτική.
3. Αντιδραστήρας παραγωγής φουρφουράλης Θερμοκρασία λειτουργίας οι 242 °C, ή 237 °C στο μεγάλο σύνθετο γράφημα. Ο αντιδραστήρας είναι εξώθερμος, άρα μπορεί να γίνει σωστή ολοκλήρωση. Καθώς είναι αρκετά ψηλά στο γράφημα, υπάρχουν σίγουρα ρεύματα πιο ψυχρά από αυτό για να το ψύξουν. Επίσης, η απαίτηση του σε ψύξη είναι αρκετά χαμηλή (13.35 MJ/hr) άρα είναι αρκετά εύκολο να χωρέσει.
4. Αντιδραστήρας παραγωγής κυκλοπεντανόνης Ο αντιδραστήρας αυτός λειτουργεί στους 160 °C και είναι εξώθερμος (ως αντίδραση υδρογόνωσης). Στο σημείο αυτό υπάρχει διαθέσιμη θερμική ενέργεια λόγω της ενεργειακής τσέπης (της τάξης των 2500 MJ/hr). Βέβαια, ο θερμοτονισμός της αντίδρασης είναι μίας τάξης μεγέθους πάνω από την απαίτηση αυτή άρα δεν μπορεί να καλυφθεί η ανάγκη από τα υπάρχοντα ρεύματα.
5. Αποστακτική στήλη κυκλοπεντανόνης Οι θερμικές απαιτήσεις της στήλης υπερβαίνουν την διαθέσιμη θερμότητα της διεργασίας άρα στην παρούσα φάση δεν μπορεί να ολοκληρωθεί. Η απαίτηση σε ψυχρό είναι 8999.76 MJ/hr, η οποία μπορεί να ικανοποιηθεί με νερό ψύξης ενώ αυτή σε θερμό είναι 9543.12 MJ/hr η οποία πρέπει να είναι ατμός σε

θερμοκρασία τουλάχιστον $140\text{ }^{\circ}\text{C}$. Εφόσον αυτή θα παραχθεί από το κύκλο Rankine, είναι εύκολο να ρυθμιστεί κατάλληλα.

6. Αντιδραστήρας σακχαροποίησης Ο αντιδραστήρας λειτουργεί στους $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ και είναι ενδόθερμος. Είναι πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης, αλλά μέσα σε μία σχετικά μεγάλη ενεργειακή τσέπη. Στο σημείο αυτό της τσέπης υπάρχει διαθέσιμη περίπου 1000 MJ/hr θερμών παροχών και η απαίτηση του αντιδραστήρα είναι (393.63 MJ/hr) άρα η ολοκλήρωση θεωρείται εφικτή.

3.2.2 Αλλαγές στο ΜΣΓ

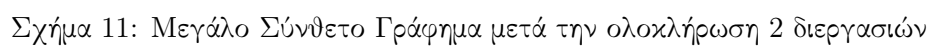
Για την αποστακτική της γλυκερόλης, αναφέρθηκε πως μπορεί να ολοκληρωθεί ως εναλλάκτης ο συμπυκνωτήρας χωρίς να ολοκληρώσουμε όλη την στήλη λόγω ανεπάρκειας ενέργειας. Άρα, στους $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ μπορούμε να πούμε πως υπάρχει ένα επιπλέον θερμό ρεύμα το οποίο έχει ενθαλπία 149.49 MJ/hr . Άρα, μπορεί η περιοχή από τους 145 μέχρι τους 139.4 να μειώσει την ενθαλπία της κατά αυτόν τον αριθμό. Η ολοκλήρωση αυτή μετακινεί τον κόμβο ανάσχεσης αρκετά πιο ψηλά στο ΜΣΓ ($227\text{ }^{\circ}\text{C}$) και κάνει τον παλιό κόμβο ανάσχεσης να είναι στα 11 περίπου MJ/hr αντί για 0 . Η ολοκλήρωση του αντιδραστήρα οδηγεί σε απαίτηση σε θερμή παροχή η οποία είναι περίπου το 0.6 της αρχικής και σε ελάχιστη αύξηση της απαίτησης σε ψυχρή παροχή, άρα είναι όντως ένα επιθυμητό σενάριο ολοκλήρωσης.

Ομοίως, ο αντιδραστήρας της φουρφουράλης είναι ένας εξώθερμος αντιδραστήρας που μπορεί να λειτουργήσει ως επιπλέον θερμό ρεύμα για την διεργασία με θερμότητα 13.35 MJ/hr στους 237 (θα προστεθεί στο interval $237\rightarrow 227$). Αν προσθέσουμε και το ρεύμα αυτό στην προηγούμενη ολοκλήρωση, παρατηρούμε μία μικρή μείωση της απαίτησης σε θερμή παροχή ($213.2\rightarrow 199.8$) καθώς και μικρή αύξηση της ενεργειακής τσέπης πάνω από τον κόμβο ανάσχεσης. Άρα, έχει θετική επίδραση παρότι αρκετά μικρότερη από την παραπάνω.

Τέλος, ο τρίτος αντιδραστήρας που αναφέρθηκε ότι μπορεί να ολοκληρωθεί είναι ο αντιδραστήρας της σακχαροποίησης της κυτταρίνης ο οποίος όμως είναι ενδόθερμος, άρα λειτουργεί ως ένα ψυχρό ρεύμα στους $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ το οποίο προσθέτει 393.63 MJ/hr στο interval $56.97\rightarrow 54.75$. Η ολοκλήρωση αυτή οδηγεί σε μία αρκετά μικρή μείωση της ψυχρής παροχής αλλά επίσης προκαλεί σχεδόν τριπλασιασμό της απαίτησης σε θερμή παροχή. Συμπέρασμα πως δεν αξίζει να γίνει μία τέτοια ολοκλήρωση όπως και οι υπόλοιπες ολοκληρώσεις του ΜΣΓ.

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

Έχοντας το ΜΣΓ αυτό, μπορούμε να προχωρήσουμε στο σχεδιασμό του κατάλληλου δικτύου εναλλαγής θερμότητας το οποίο θα έχει η διεργασία. Αυτό όμως θα γίνει σε επόμενο στάδιο.



Πίνακας 15: Δεδομένα για τον ενεργειακό καταρράκτη

| Cumulative Dh | T |
|---------------|-------|
| 199.815 | 283.9 |
| 328.481 | 248 |
| 317.341 | 238 |
| 326.4 | 237 |
| 0 | 227 |
| 2561.976 | 155 |
| 3002.576 | 145 |
| 3075.419 | 139.4 |
| 3018.452 | 135 |
| 2921.582 | 125 |
| 2131.552 | 85.65 |
| 1870.202 | 75.65 |
| 1848.523 | 74.9 |
| 1517.543 | 64.9 |
| 1216.330 | 56.97 |
| 1140.475 | 54.75 |
| 281.831 | 45 |
| 10.921 | 35 |
| 317.481 | 25 |

3.2.3 Απαίτηση σε θερμές παροχές

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει να δούμε πόση ποσότητα ατμού χρειάζεται και σε τι επίπεδα χρειάζεται αυτή. Αυτό είναι ενδιαφέρον επειδή ο ατμός παράγεται από ενσωματωμένο κύκλο Rankine της διεργασίας, άρα μπορούν να επιλεγθούν τα επίπεδα κατάλληλα ανάλογα με τις απαιτήσεις. Η υψηλότερη στάθμη του ατμού είναι αρκετά υψηλή, άρα σίγουρα μπορούν να καλυφθούν όλες οι ανάγκες. Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη πως λόγω του κόστους των στροβίλων, είναι σπανίως οικονομικά επιθυμητό να έχουμε πάνω από 3 στρόβιλους στο κύκλο, άρα πάνω από 4 επίπεδα ατμού.

Πίνακας 16: Απαιτούμενα επίπεδα ατμού

| Απαίτηση | Θερμότητα (MJ/hr) | Θερμοκρασία (C) |
|------------------------------|-------------------|-----------------|
| ΜΣΓ | 199.82 | 250 |
| Αναβραστήρας Γλυκερόλης | 1105.44 | 300 |
| Αναβραστήρας Κυκλοπεντανόνης | 9543.12 | 140 |
| Αντιδραστήρας Σακχαροποίησης | 393.63 | 60 |

Από τα 4 ρεύματα αυτά, είναι εύκολο να παρατηρηθούν τα δύο επίπεδα που χρειάζονται. Το πρώτο πρέπει να είναι στους 300 °C τουλάχιστον με θερμική δυνατότητα περίπου 1300 MJ/hr ενώ το δεύτερο πρέπει να είναι στους 140 °C τουλάχιστον με θερμική δυνατότητα 10000 MJ/hr περίπου.

Το 1ο επίπεδο είναι ο ατμός υψηλής πίεσης ο οποίος παράγεται από τα καυσάερια. Για να παράγει ικανοποιητικά ποσά ενέργειας το κύκλο, πρέπει να είναι τουλάχιστον στα 100 bar, ώστε η εκτόνωση του να δώσει πολύ έργο. Ο ατμός που χρησιμοποιείται είναι στα 150 bar και 700 °C. Η πρώτη βαθμίδα εκτόνωσης τοποθετείται στα 30 bar όπου ο ατμός έχει θερμοκρασία 443 °C και η θερμοκρασία του μειώνεται στους 364 °C. Η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή διότι ξεκινάμε από ατμό πολύ μεγάλης θερμοκρασίας και πίεσης και η εκτόνωση αυτή οδηγεί

σε αυτήν την θερμοκρασία. Όμως, αυτό είναι καλό επειδή σημαίνει ότι και μετά την θέρμανση που πρέπει να κάνει, είναι ακόμη υπέρθερμος με σχετικά μεγάλο βαθμό υπερθέρμανσης άρα μπορεί να τοποθετηθεί ασφαλώς σε δεύτερο στρόβιλο όπου θα εκτονωθεί μέχρι τα 4 bar και θερμοκρασία 151 °C ώστε να καλύψει τις ανάγκες που χρειάζονται σε χαμηλή θερμοκρασία. Η ποσότητα που χρησιμοποιήθηκε επαρκεί ώστε ο ατμός να φτάσει σε μίγμα με την υγρή φάση ποιότητας 0.5 περίπου. Θα μπορούσαμε να τραβήξουμε μικρότερη ποσότητα εξαρχής, αλλά κινδυνεύουμε να δημιουργηθεί υγρή φάση μέσα στον στρόβιλο (καθώς το νερό είναι κοντά στον κορεσμό του ως έχει) και επίσης, δυσχεραίνουμε την αναθέρμανση η οποία γίνεται με τον υπόλοιπο ατμό στα 30 bar. Η τέταρτη βαθμίδα είναι το νερό χαμηλής πίεσης που τροφοδοτούμε, το οποίο έχει πίεση 0.1 bar.

4 Κοστολόγηση

4.1 Προεπεξεργασία (Blocks 100-200)

4.2 Κύκλο Rankine (Block 300)

4.3 Παραγωγή και Καθαρισμός Γλυκερόλης (Blocks 400-500)

Έγινε οικονομική αξιολόγηση των blocks 400-500, με τελικό προϊόν την 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 παρακάτω πίνακα. Η παρούσα οικονομική ανάλυση ασχολείται με τις διεργασίες που χρησιμοποιούνται από την έξοδο του βιοαντιδραστήρα και μετά, συνεπώς δεν αγοράζεται κάποια πρώτη ύλη.

Πίνακας 17: Συνολικό κόστος διεργασίας

| Summary | |
|----------------------------------------|--------|
| Total Capital Cost [kEuro] | 4061 |
| Total Operating Cost [kEuro/Year] | 2667 |
| Total Product Sales [kEuro/Year] | 8856 |
| Total Utilities Cost [kEuro/Year] | 1373 |
| Desired Rate of Return [Percent/'Year] | 18,4 |
| P.O. Period [Year] | 1,9336 |
| Equipment Cost [kEuro] | 392 |
| Total Installed Cost [kEuro] | 1349 |

Συνεπώς για την εγκατάσταση αυτού του εξοπλισμού απαιτούνται 1741,744 kEuro, και αφού ξεκινήσει να λειτουργεί αυτή η θα έχει συνολικό ετήσιο κέρδος της τάξεως των 755,2372 kEuro/y, που σημαίνει ότι θα χρειαστούν γύρω στα 2,3 χρόνια για να γίνει απόσβεση του κόστους εγκατάστασης αυτών των διεργασιών.

Παρουσιάζεται πίνακας με την αναλυτική κοστολόγηση κάθε εξοπλισμού της διεργασίας

Η οικονομική ανάλυση για τις βοηθητικές παροχές που παρουσιάζεται εδώ, αποτελεί την περίπτωση όπου το block 300 της συνολικής διεργασίας δεν αρκεί για να τις καλύψει, παρόλο που προσφέρει μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας και θερμών παροχών. Συνεπώς αυτή η οικονομική ανάλυση αποτελεί ένα worst case scenario όσον αφορά την ηλεκτρική ενέργεια και τις θερμές παροχές, ενώ η ανάλυση για τις ψυχρές παραμένει έγκυρη.

Παρουσιάζονται πίνακες για τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού που προέκυψαν από την διαστασιολόγηση.

Πίνακας 18: Αναλυτική Κοστολόγηση Εξοπλισμού

| Name | Equipment Cost [Euro] | Installed Cost [Euro] | Equipment Weight [Kg] |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| H-502 | 23368 | 120520 | 2540,1152 |
| C-501 | 128984 | 171948 | 2131,8824 |
| H-501 | 8372 | 65228 | 231,33192 |
| H-503 | 25392 | 124936 | 2857,6296 |
| R-401 | 81236 | 221536 | 3810,1728 |
| D-501-cond | 7728 | 50508 | 117,93392 |
| D-501-cond acc | 15180 | 105248 | 1224,6984 |
| D-501-reb | 40388 | 118036 | 4490,5608 |
| D-501-reflux pump | 4416 | 27876 | 90,7184 |
| D-501-tower | 33672 | 172224 | 2313,3192 |
| F-501-flash vessel | 23828 | 171120 | 2086,5232 |
| Name | Installed Weight [Kg] | | |
| H-502 | 12602,60013 | | |
| C-501 | 4186,65416 | | |
| H-501 | 3777,514176 | | |
| H-503 | 13640,41862 | | |
| R-401 | 11077,62382 | | |
| D-501-cond | 2105,120472 | | |
| D-501-cond acc | 5870,841256 | | |
| D-501-reb | 9960,426728 | | |
| D-501-reflux pump | 1126,268936 | | |
| D-501-tower | 9538,132576 | | |
| F-501-flash vessel | 11794,75278 | | |

Πίνακας 19: Κοστολόγηση βοηθητικών παροχών

| Utilities | | | | | |
|---------------|-------|----------|------------|---------------|------------|
| Name | Fluid | Rate | Rate Units | Cost per Hour | Cost Units |
| Electricity | | 97,173 | KW | 6,92843444 | Euro/H |
| Cooling Water | Water | 0,00085 | MMGAL/H | 0,09384 | Euro/H |
| Steam @100PSI | Steam | 19,97789 | KLB/H | 149,610423 | Euro/H |

Πίνακας 20: Διαστασιολόγηση Εναλλακτών Θερμότητας

TEMA HEX

| User tag number | H-502 | H-501 | H-503 | D-501-cond |
|------------------------------------|----------|----------|----------|-------------|
| Number of identical items | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Heat transfer area [sqm] | 91,5801 | 2,557231 | 110,8726 | 0,382876279 |
| Front end TEMA symbol | B | B | B | B |
| Shell TEMA symbol | E | E | E | E |
| Rear end TEMA symbol | M | M | M | M |
| Tube design gauge pressure [barg] | 0,020961 | 1,285044 | 7,605461 | 4,1579608 |
| Tube design temperature [C] | 167,789 | 316,71 | 192,1111 | 243,5217839 |
| Tube operating temperature [C] | 95 | 44 | 164,3333 | 35 |
| Tube outside diameter [meter] | 0,0254 | 0,0254 | 0,0254 | 0,0254 |
| Shell design gauge pressure [barg] | 0,020961 | 2,434211 | 4,732544 | 2,4342108 |
| Shell design temperature [C] | 167,789 | 316,71 | 167,7778 | 243,5217839 |
| Shell operating temperature [C] | 140,0112 | 288,9322 | 140 | 215,7440061 |
| Tube length extended [meter] | 6,096 | 6,096 | 6,096 | 6,096 |
| Tube pitch [meter] | 0,03175 | 0,03175 | 0,03175 | 0,03175 |
| Number of tube passes | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Number of shell passes | 1 | 1 | 1 | 1 |

Πίνακας 21: Διαστασιολόγηση φυγοκέντρου

Solid bowl centrif

| User tag number | C-501 |
|-----------------------|--------------------------------|
| Remarks 1 | Equipment mapped from 'C-501'. |
| Bowl diameter [meter] | 0,4572 |
| Bowl length [meter] | 1,016 |
| Flow rate [kg/hr] | 1874,336 |

Πίνακας 22: Διαστασιολόγηση συμπληκνωτή αποστακτικής στήλης

Horizontal drum

| User tag number | D-501-cond acc |
|------------------------------------------|--------------------------------|
| Remarks 1 | Equipment mapped from 'D-501'. |
| Liquid volume [l] | 1801,449698 |
| Vessel diameter [meter] | 0,9144 |
| Vessel tangent to tangent length [meter] | 2,7432 |
| Design gauge pressure [barg] | 1,03425 |
| Vacuum design gauge pressure [barg] | -1,00667 |
| Design temperature [C] | 172,1626089 |
| Operating temperature [C] | 144,3848311 |

Πίνακας 23: Διαστασιολόγηση αναθερμαντή αποστακτικής στήλης
U-tube reboiler

| User tag number | D-501-reb |
|------------------------------------|--------------------------------|
| Remarks 1 | Equipment mapped from 'D-501'. |
| Number of identical items | 1 |
| Heat transfer area [sqm] | 140,2956413 |
| Tube design gauge pressure [barg] | 1,28504411 |
| Tube design temperature [C] | 343,3333333 |
| Tube operating temperature [C] | 288,9322461 |
| Tube outside diameter [meter] | 0,0254 |
| Shell design gauge pressure [barg] | 2,4342108 |
| Shell design temperature [C] | 343,3333333 |
| Shell operating temperature [C] | 315,5555556 |
| Tube length extended [meter] | 6,096 |
| Tube pitch [meter] | 0,03175 |
| Tube pitch symbol | TRIANGULAR |
| Number of tube passes | 2 |
| Duty [cal/sec] | 73342,06549 |
| TEMA type | BKU |

Πίνακας 24: Διαστασιολόγηση αντλίας αποστακτικής στήλης
Centrif pump

| User tag number | D-501-reflux pump |
|------------------------------|--------------------------------|
| Remarks 1 | Equipment mapped from 'D-501'. |
| Liquid flow rate [l/min] | 1,78125534 |
| Fluid specific gravity | 1,159661 |
| Design gauge pressure [barg] | 1,03425 |
| Design temperature [C] | 172,1626089 |
| Fluid viscosity [cP] | 0,5 |
| Pump efficiency [fraction] | 0,7 |

Πίνακας 25: Διαστασιολόγηση αποστακτικής στήλης
Multi-diameter tower

| User tag number | D-501-tower |
|------------------------------------------|--------------------------------|
| Remarks 1 | Equipment mapped from 'D-501'. |
| Diameter Bottom section [meter] | 0,6096 |
| Bottom tangent to tangent height [meter] | 7,3152 |
| Design gauge pressure Bottom [barg] | 2,4342108 |
| Design temperature Bottom [C] | 316,7100239 |
| Operating temperature Bottom [C] | 288,9322461 |
| Number of trays Bottom section | 6 |
| Bottom Tray type | SIEVE |
| Bottom Tray spacing [meter] | 0,6096 |
| Molecular Wt Overhead Prod. | 92,068115 |

Πίνακας 26: Διαστασιολόγηση του Flash διαχωριστήρα

| Vertical vessel | |
|------------------------------------------|--------------------------------|
| User tag number | F-501-flash vessel |
| Remarks 1 | Equipment mapped from 'F-501'. |
| Liquid volume [l] | 8073,163475 |
| Vessel diameter [meter] | 1,6764 |
| Vessel tangent to tangent height [meter] | 3,6576 |
| Design gauge pressure [barg] | 1,03425 |
| Design temperature [C] | 167,7777778 |
| Operating temperature [C] | 140 |

4.4 Παραγωγή και Καθαρισμός Κυκλοπεντανόνης (Blocks 600-700)