

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ - ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΤΕΣΜΑΤΙΚΗ ΔΕΣΜΕΥΣΗ CO₂ ΑΠΟ ΑΠΑΕΡΙΑ ΚΑΥΣΗΣ**Χ. Χατζηαστερίου^{1,2,*}, Μ. Γεωργιάδης^{1,2}, Ε. Κικκινίδης^{1,2}**¹Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα²Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Θέρμη, Ελλάδα(*cchatziast@cheng.auth.gr)**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια θεωρητική-υπολογιστική μελέτη διεργασιών διαχωρισμού αερίων με έμφαση στους διαχωρισμούς μιγμάτων CO₂-N₂. Μελετώνται διεργασίες μεμβρανών και προσρόφησης P/VSA. Από τον συνδυασμό τους μπορεί να προκύψει μια διεργασία ικανή να οδηγήσει στον αποδοτικό διαχωρισμό με χαμηλότερες απαιτήσεις σε ενέργεια σε σύγκριση με την χημική απορρόφηση, που αποτελεί την πλέον διαδεδομένη διεργασία για το σκοπό αυτό. Τα μαθηματικά μοντέλα των διεργασιών μεμβρανών και P/VSA επιλύονται και βελτιστοποιούνται με σκοπό να πετύχουν την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας, με ταυτόχρονη υψηλή καθαρότητα και ανάκτηση σε CO₂. Η πίεση λειτουργίας είναι μεγαλύτερη ή ίση με 0.1 bar ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε βιομηχανική κλίμακα. Αρχικά, μελετήθηκε μια διεργασία P/VSA ώστε να βρεθεί το όριο σύστασης τροφοδοσίας μέχρι το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί διαχωρισμός με χρήση ενός μόνο σταδίου. Το όριο αυτό είναι ~30% και η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται είναι 90.8 kWh/tn CO₂ για προϊόν με 95% καθαρότητα και 90% ανάκτηση. Η διεργασία δύο σταδίων P/VSA μπορεί να θεωρηθεί ως πρότυπη διεργασία, αφού είναι η βασική εναλλακτική λύση για την αποφυγή της απορρόφησης χωρίς να απαιτείται βαθύ κενό. Στην ίδια σύσταση, η βελτιστοποίηση της παρουσιάζει ελάχιστη κατανάλωση 145.9 kWh/tn CO₂. Στη συνέχεια, έγινε βελτιστοποίηση της συνδυασμένης διεργασίας μεμβράνης-P/VSA. Προέκυψε ότι η συνδυασμένη διεργασία απαιτεί κατ' ελάχιστο 89.9 kWh/tn CO₂ για να οδηγήσει στον αντίστοιχο διαχωρισμό με τις παραπάνω διεργασίες. Συνεπώς, είναι φανερό ότι στο χαμηλότερο όριο σύστασης τροφοδοσίας όπου είναι δυνατή η χρήση ενός σταδίου P/VSA, η διεργασία P/VSA απαιτεί πρακτικά ίδια ποσότητα ενέργειας με την συνδυασμένη διεργασία μεμβρανών-P/VSA, ενώ η διεργασία δύο σταδίων P/VSA έχει σημαντικά μεγαλύτερες απαιτήσεις.

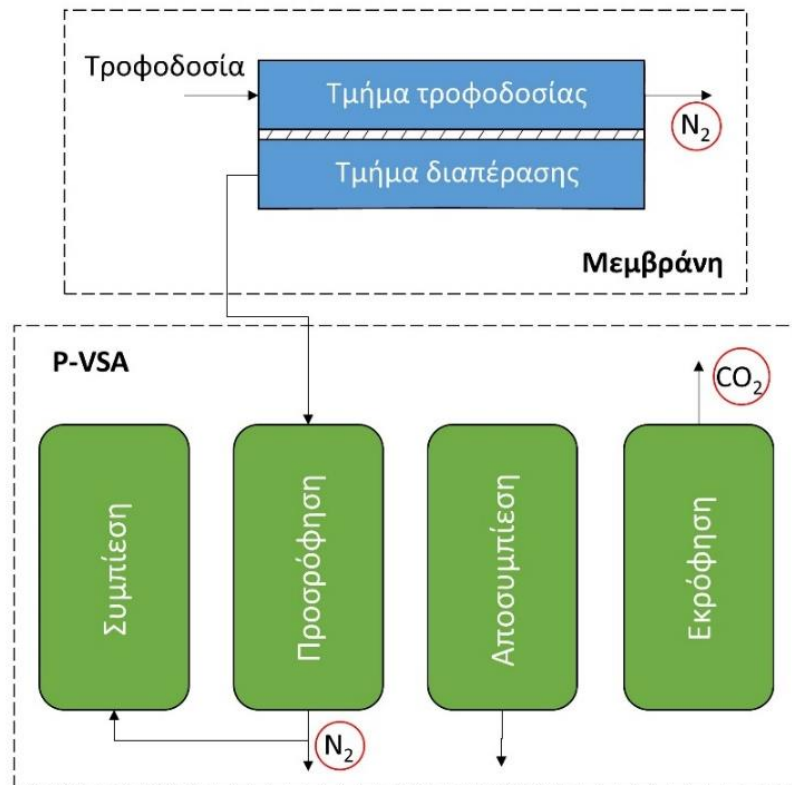
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: προσρόφηση P/VSA, μεμβράνες, συνδυασμένη διεργασία, βελτιστοποίηση**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας οφείλεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αυτό είναι αποτέλεσμα της ανεξέλεγκτης έκλυσης ανθρωπογενούς προέλευσης αερίων του θερμοκηπίου, και ιδιαίτερα του CO₂, στην ατμόσφαιρα^[1]. Συνεπώς, είναι μεγάλης σημασίας η ανάπτυξη διεργασιών που να δεσμεύουν το CO₂ πριν απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα. Αναλόγως της εφαρμογής, εκπέμπονται απαέρια διαφορετικής σύστασης σε CO₂ (χαμηλότερη για απαέρια καύσης, μεγαλύτερη σε βιομηχανίες παραγωγής σιδήρου ή τσιμέντου)^[2].

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος δέσμευσης CO₂ είναι η απορρόφηση με χρήση των κατάλληλων διαλυτών. Η διεργασία αυτή, όμως, απαιτεί μεγάλες ποσότητες ενέργειας για την εκρόφηση του απορροφημένου CO₂^[3]. Συνεπώς κρίνεται αναγκαία η μελέτη και η ανάπτυξη εναλλακτικών διεργασιών που να ξεπερνούν το πρόβλημα της μεγάλης απαίτησης σε ενέργεια, ικανοποιώντας ταυτόχρονα τις ελάχιστες απαιτήσεις που έχουν οριστεί από το υπουργείο ενέργειας των ΗΠΑ (US/DOE). Οι απαιτήσεις αυτές είναι ελάχιστη καθαρότητα 95% και ελάχιστη ανάκτηση 90% στο ρεύμα του προϊόντος^[4].

Οι πιο διαδεδομένες τέτοιες διεργασίες είναι η προσρόφηση στην επιφάνεια κατάλληλων προσροφητικών υλικών μέσω μιας διεργασίας προσρόφησης με εναλλαγές πίεσης-κενού (Pressure/Vacuum Swing Adsorption – P/VSA) καθώς και οι διεργασίες μεμβρανών. Οι διεργασίες προσρόφησης έχουν το μειονέκτημα ότι για να πετύχουν τους επιθυμητούς στόχους είναι απαραίτητη μια πολύ χαμηλή πίεση κενού ($P \ll 0.1$ bar), η οποία είναι μη εφαρμόσιμη σε βιομηχανική κλίμακα^[5]. Αντίστοιχα, στις διεργασίες μεμβρανών είναι αδύνατος ο αποδοτικός διαχωρισμός σε ένα στάδιο της διεργασίας, με αποτέλεσμα να απαιτούνται πολλαπλά στάδια και συνεπώς να αυξάνεται το συνολικό κόστος^[6].

Για να ξεπεραστούν τα παραπάνω μειονεκτήματα, έχει επιχειρηθεί η χρήση διατάξεων περισσότερων σταδίων και πιο πολύπλοκων διατάξεων, τα οποία όμως αυξάνουν το συνολικό κόστος της διεργασίας. Διατάξεις P/VSA δύο σταδίων και διατάξεις δύο, τριών ή και τεσσάρων σταδίων μεμβρανών είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία^[6]. Ωστόσο, μια διάταξη συνδυασμένης διεργασίας η οποία περιλαμβάνει ένα στάδιο P/VSA και ένα στάδιο μεμβράνης μπορούν επίσης να επιτύχουν τους ζητούμενους στόχους. Σε προηγούμενη εργασία δείχθηκε ότι η διάταξη με μεμβράνη ως πρώτο στάδιο και προσρόφηση ως δεύτερο στάδιο (Σχήμα 1) οδηγεί στη διεργασία που πετυχαίνει τους στόχους καθαρότητας και ανάκτησης με την χαμηλότερη κατανάλωση σε ενέργεια σε σύγκριση με την αντίστροφη διεργασία και την αντίστοιχη διεργασία δύο σταδίων P/VSA^[7].



Σχήμα 1. Συνδυασμένη διεργασία μεμβρανών-προσρόφησης P/VSA.

Ο πιο γρήγορος τρόπος για να γίνει ο σχεδιασμός των παραπάνω διεργασιών είναι μέσα από την προσομοίωση τους με χρήση των κατάλληλων εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα. Οι βασικές παραδοχές που θεωρούνται για τις διεργασίες σε συνάρτηση με τα υπολογιστικά εργαλεία που είναι πλέον διαθέσιμα, επιτρέπουν την εύκολη πρόβλεψη της απόδοσης των διεργασιών με μεγάλη ακρίβεια. Επιπλέον, η χρήση εργαλείων βελτιστοποίησης για την εύρεση της αποδοτικότερης διεργασίας με συστηματικό τρόπο μπορεί να οδηγήσει στον ιδανικό σχεδιασμό της διεργασίας με σχετικά μικρό υπολογιστικό κόστος.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Τα μαθηματικά μοντέλα των διεργασιών της μεμβράνης^[8] και του P/VSA^[5] περιγράφουν τα φαινόμενα που πραγματοποιούνται μέσω ορισμένων διαφορικών εξισώσεων. Στις αντίστοιχες αναφορές δίνονται και οι σχεδιαστικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε μοντέλο. Οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τις διεργασίες επιλύθηκαν με τη χρήση του προγράμματος gPROMSTM για να προκύψει η προσομοίωση κάθε διεργασίας.

Για τη διεργασία της μεμβράνης θεωρήθηκε διάταξη τύπου κελύφους-αυλών, με κυλινδρική γεωμετρία της μεμβράνης. Η τροφοδοσία εισέρχεται στο εσωτερικό των κυλίνδρων, ενώ το προϊόν λαμβάνεται από το εξωτερικό κέλυφος της διάταξης. Ο διαχωρισμός πραγματοποιείται κατ' αντιρροή, καθώς έτσι προκύπτει η καλύτερη απόδοση. Η διαπερατότητα της μεμβράνης ως προς το CO₂ και ως προς το N₂ ορίζονται μέσα στο μαθηματικό μοντέλο ως οι μοναδικές ιδιότητες που επηρεάζουν τη μεταφορά μάζας, χωρίς να γίνεται διάκριση στο υλικό από το οποίο κατασκευάζεται η μεμβράνη. Η εκλεκτικότητα της μεμβράνης στο ένα συστατικό σε σχέση με το άλλο είναι μια ιδιότητα για τη σύγκριση διαφορετικών υλικών και ορίζεται ως το πηλίκο των διαπερατοτήτων των συστατικών. Θεωρήθηκε ότι μια μεμβράνη με εκλεκτικότητα CO₂/N₂ 50 είναι αρκούτως ικανοποιητική και ταυτόχρονα δεν εμφανίζει σημαντικές δυσκολίες στην κατασκευή της.

Η διεργασία P/VSA αποτελείται από τέσσερα βήματα, και διαφοροποιείται από τον τυπικό κύκλο Skarstrom στο βήμα της εκρόφησης το οποίο πραγματοποιείται με χρήση κενού και στο βήμα της συμπίεσης, το οποίο πραγματοποιείται με ελαφρύ προϊόν κατ' αντιρροή ως προς την προσρόφηση. Αξίζει να σημειωθεί ότι το καταλληλότερο προσροφητικό υλικό για τη δέσμευση CO₂ από απαέρια καύσης μέχρι στιγμής είναι ο ζεόλιθος 13X και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται αποκλειστικά στην παρούσα μελέτη. Επιπλέον, η πίεση εκρόφησης πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από 0.1 bar για να μπορεί να εφαρμοστεί σε βιομηχανική κλίμακα. Συνεπώς, αυτή η τιμή της πίεσης ορίζεται σε όλες τις περιπτώσεις της διεργασίας προσρόφησης.

Η προσομοίωση της συνδυασμένης διεργασίας μεμβρανών-προσρόφησης πραγματοποιείται θέτοντας την σύσταση της τροφοδοσίας του δεύτερου σταδίου ίση με την καθαρότητα του προϊόντος που προκύπτει από το πρώτο στάδιο. Οι δείκτες αποδοτικότητας της συνολικής διεργασίας μπορούν να υπολογιστούν ως συνάρτηση των δεικτών αποδοτικότητας των δύο επιμέρους σταδίων^[9].

$$\text{Καθαρότητα}_{ολική} = \text{Καθαρότητα}_2 \quad (1)$$

$$\text{Ανάκτηση}_{ολική} = \text{Ανάκτηση}_1 \cdot \text{Ανάκτηση}_2 \quad (2)$$

$$\text{Ενέργεια}_{ολική} = \frac{\text{Ενέργεια}_1}{\text{Ανάκτηση}_2} + \text{Ενέργεια}_2 \quad (3)$$

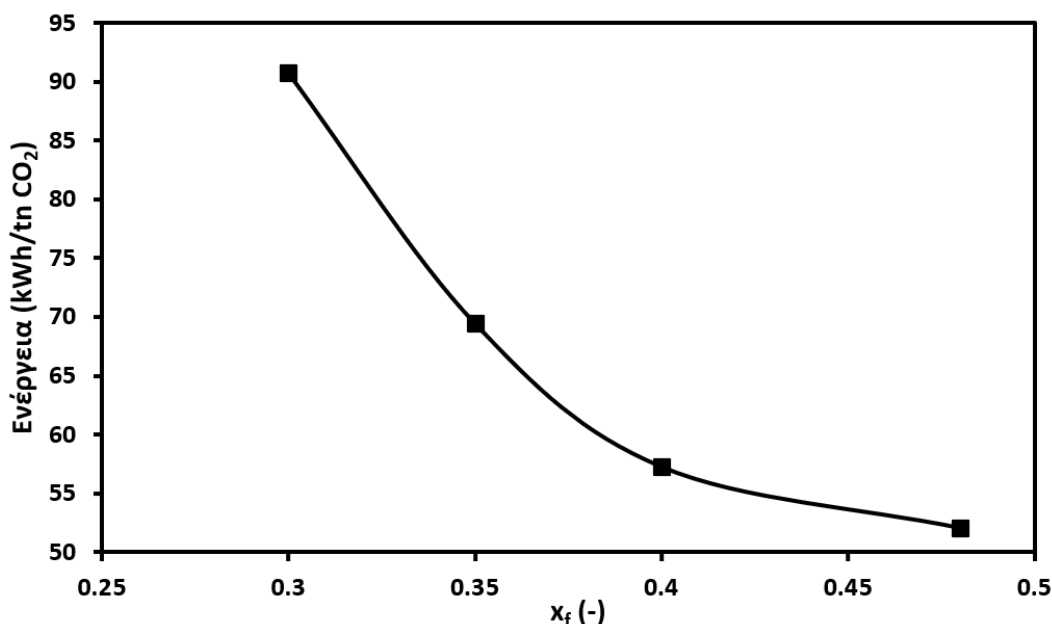
Τα δεδομένα του Πίνακα 1 μαζί με τις εξισώσεις του μαθηματικού μοντέλου των διεργασιών αποτελούν το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, ζητείται η διεργασία με την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας, κάτω από τους περιορισμούς καθαρότητας και ανάκτησης. Τις μεταβλητές απόφασης για το πρόβλημα βελτιστοποίησης αποτελούν η πίεση του τμήματος τροφοδοσίας της μεμβράνης $P_{h,mem}$, η πίεση του τμήματος διαπέρασης της μεμβράνης P_L , η παροχή τροφοδοσίας της μεμβράνης F_{feed} , η πίεση προσρόφησης $P_{h,ads}$, η ενδιάμεση πίεση του βήματος της αποσυμπίεσης του P/VSA P_I και η ταχύτητα τροφοδοσίας του P/VSA u_f . Το άνω άκρο των υψηλών πιέσεων $P_{h,mem}$ και $P_{h,ads}$ ορίστηκε 1.5 bar, διότι μεγαλύτερες πιέσεις αυξάνουν κατακόρυφα την ενεργειακή κατανάλωση, τακτική η οποία κρίνεται ως μη συμφέρουσα. Για την προσρόφηση, τα ίδια όρια των μεταβλητών απόφασης ορίστηκαν τόσο στην περίπτωση της διεργασίας ενός σταδίου, όσο και στη συνδυασμένη διεργασία στην οποία αποτελεί το δεύτερο στάδιο.

Πίνακας 1. Δεδομένα προβλήματος βελτιστοποίησης.

Αντικειμενική συνάρτηση	Περιορισμοί	Μεταβλητές απόφασης μεμβράνης	Μεταβλητές απόφασης P/VSA
min Κατανάλωση ενέργειας	Καθαρότητα CO ₂ ≥ 95%	1.0 bar ≤ P _{h, mem} ≤ 1.5 bar	1.0 bar ≤ P _{h, ads} ≤ 1.5 bar
	Ανάκτηση CO ₂ ≥ 90%	0.10 bar ≤ P _L ≤ 0.99 bar	0.10 bar ≤ P _I ≤ 0.99 bar
		0 mol/s ≤ F _{feed} ≤ 10 ⁻⁴ mol/s	0.30 m/s ≤ u _f ≤ 1.2 m/s

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Είναι γνωστό πως είναι αδύνατο να επιτευχθεί διαχωρισμός με προϊόν ελάχιστης καθαρότητας 95% και ποσοστό ανάκτησης 90% σε μια διεργασία P/VSA ενός σταδίου με σύσταση τροφοδοσίας 15%. Σε προηγούμενη μελέτη^[7], το δεύτερο στάδιο της συνδυασμένης διεργασίας, δηλαδή η διεργασία προσρόφησης, πέτυχε τους προαναφερθέντες στόχους για σύσταση ~50%. Επομένως, είναι λογικό να αναζητηθεί το όριο στη σύσταση τροφοδοσίας κάτω από το οποίο καθίσταται αδύνατος ο αποδοτικός διαχωρισμός. Μέσω μιας σειράς βελτιστοποιήσεων μπορεί να γίνει εκτίμηση για το συγκεκριμένο όριο, διατηρώντας τους περιορισμούς καθαρότητας και ανάκτησης του προϊόντος. Το Σχήμα 2 δείχνει την βέλτιστη λύση για τις διάφορες συστάσεις.

**Σχήμα 2.** Ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια ως συνάρτηση της σύστασης τροφοδοσίας.

Όπως αναμένεται, όσο πιο αραιό είναι το μίγμα της τροφοδοσίας, τόσο περισσότερο αυξάνεται η ανάγκη για ενέργεια προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητοί στόχοι. Για σύσταση τροφοδοσίας κάτω από 30%, η πίεση που απαιτείται για την επίτευξη των στόχων αναμένεται μεγαλύτερη από 1.5 bar που τέθηκε ως όριο της μεταβλητής απόφασης (Σχήμα 3). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην μπορεί να βρεθεί εφικτή λύση. Αν το όριο της μεταβλητής απόφασης της πίεσης κατά τη βελτιστοποίηση αυξηθεί, τότε είναι πιθανόν να υπάρχει βέλτιστη λύση, με σημαντικά αυξημένη, όμως, τιμή της απαιτούμενης ενέργειας. Για το λόγο αυτό η διεργασία P/VSA ενός σταδίου κρίνεται ως μη συμφέρουσα όταν η σύσταση της τροφοδοσίας είναι χαμηλότερη από 30% και δεν γίνεται περαιτέρω ανάλυση.

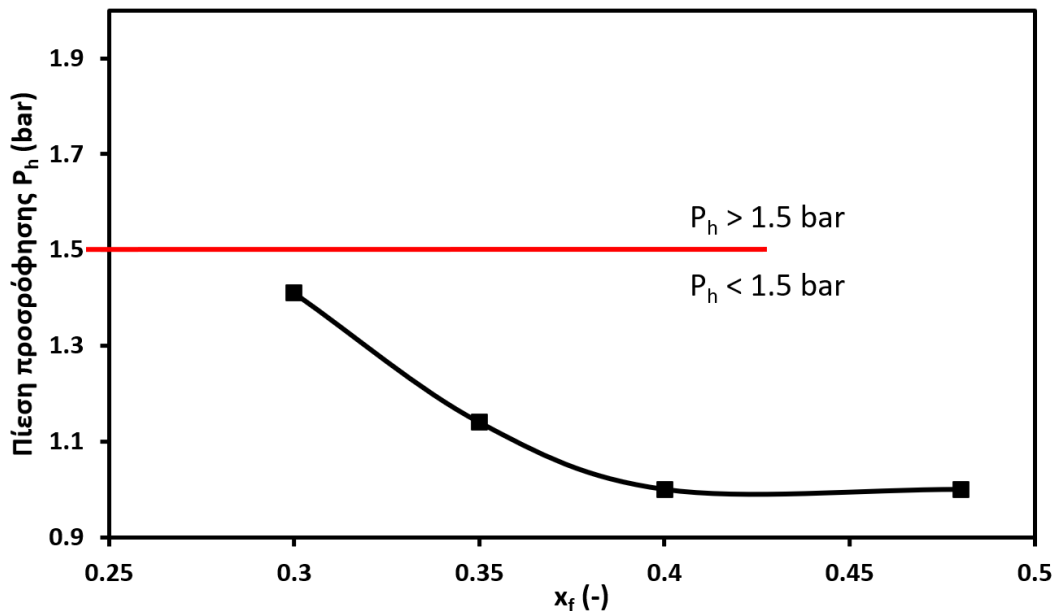
Η επικρατούσα τακτική για την αποφυγή εξαιρετικά χαμηλών πιέσεων κατά την εκρόφηση στο P/VSA είναι ο επιμερισμός του καθήκοντος διαχωρισμού σε δύο στάδια προσρόφησης. Σε καθένα από αυτά θα εφαρμοστούν πιο ήπιες συνθήκες κενού. Μια τέτοια διεργασία έχει μελετηθεί ευρέως

για πιο αραιά μίγματα προς διαχωρισμό, ωστόσο έχει ενδιαφέρον και η απόδοση της για τροφοδοσία με 30% CO₂. Η βελτιστοποίηση της διεργασίας οδήγησε στα αποτελέσματα του Πίνακα 2.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η διεργασία αυτή έχει εξαιρετικά μεγάλη συνολική κατανάλωση ενέργειας, κυρίως λόγω της ανάγκης για αύξηση της πίεσης στο βήμα της προσρόφησης του πρώτου σταδίου. Φαίνεται ότι ο μερικός διαχωρισμός του μίγματος και στη συνέχεια η εφαρμογή διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας για την επίτευξη των ζητούμενων στόχων καθαρότητας και ανάκτησης δεν είναι η ιδανική στρατηγική όταν επιθυμείται διαχωρισμός πυκνότερων μιγμάτων.

Πίνακας 2. Βελτιστοποίηση διεργασίας δύο σταδίων P/VSA.

Στάδιο	P _i (bar)	P _h (bar)	u _i (m/s)	Καθαρότητα (%)	Ανάκτηση (%)	Ενέργεια (kWh/t)
1 ^ο	0.92	1.2	0.69	48.4	100	85.4
2 ^ο	0.82	1.0	0.66	95.0	91.0	52.1
Συνολικά	-	-	-	95.0	91.0	145.9



Σχήμα 3. Βέλτιστη απαιτούμενη πίεση προσρόφησης σε διάφορες συστάσεις τροφοδοσίας.

Το ερώτημα που γεννάται είναι αν μια συνδυασμένη διεργασία μεμβρανών-προσρόφησης είναι πιο αποδοτική από την διεργασία δύο σταδίων P/VSA και αν τελικά οδηγεί σε χαμηλότερη ανάγκη για ενέργεια σε σύγκριση με την διεργασία ενός σταδίου. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε η βελτιστοποίηση και αυτής της διεργασίας. Οι βέλτιστες τιμές των μεταβλητών που οδηγούν στην ελάχιστη συνολική ενέργεια, καθώς και τα αποτελέσματα κάθε επιμέρους διεργασίας δίνονται στον Πίνακα 3.

Η ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας στην συνδυασμένη διεργασία είναι 89.9 kWh/tn CO₂. Για ακόμη μια φορά το βέλτιστο σενάριο είναι αυτό στο οποίο δεν απαιτείται συμπίεση της τροφοδοσίας σε κανένα από τα δύο στάδια. Επιπλέον, προτιμάται το πρώτο στάδιο να εμπλουτίσει ελαφρώς το μίγμα σε CO₂ διατηρώντας υψηλή ανάκτηση. Η προσρόφηση στο δεύτερο στάδιο αναλαμβάνει το μεγαλύτερο καθήκον του διαχωρισμού.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα συνδυασμένης διεργασίας μεμβράνης-P/VSA για σύσταση τροφοδοσίας 30% CO₂.

1 ^ο στάδιο	P _L (bar)	P _h (bar)	F _{feed} (mol/s)	Καθαρότητα (%)	Ανάκτηση (%)	Ενέργεια (kWh/t)
	0.51	1.0	4.9·10 ⁻⁶	44.6	98.1	32.6
2 ^ο στάδιο	P _i (bar)	P _h (bar)	u _f (m/s)			
	0.49	1.0	0.48	95.0	91.8	54.4
Συνολικά				95.0	90.0	89.9

Η βελτιστοποίηση της συνδυασμένης διεργασίας οδηγεί σε παραπλήσια κατανάλωση σε σύγκριση με την αντίστοιχη ενέργεια του ενός σταδίου P/VSA. Ωστόσο, εφόσον οι καταναλώσεις είναι πρακτικά ίδιες, είναι προτιμότερο να γίνει χρήση της διεργασίας ενός σταδίου P/VSA καθώς στην περίπτωση της συνδυασμένης διεργασίας απαιτείται τεχνολογία για δύο διαφορετικές διεργασίες, χωρίς κάποιο επιπλέον κέρδος.

Σε χαμηλότερες συστάσεις τροφοδοσίας, όπου δεν είναι αποτελεσματική η προσρόφηση ενός σταδίου χωρίς ακραία πίεση κενού, η επιλογή της συνδυασμένης διεργασίας είναι αναμφισβήτητη η καλύτερη, εφόσον παραμένει η διαφορά στην απαιτούμενη ενέργεια σε σύγκριση με την διεργασία δύο σταδίων P/VSA.

Συμπερασματικά, και οι τρεις διεργασίες που μελετήθηκαν έχουν τη δυνατότητα να παράξουν προϊόν καθαρότητας 95% CO₂ με συνολική ανάκτηση 90% με ήπιες συνθήκες κενού. Ως προς την απαίτηση σε ενέργεια, η σειρά με την οποία κατατάσσονται είναι: P/VSA δύο σταδίων > P/VSA ενός σταδίου > συνδυασμένη διεργασία δύο σταδίων. Η σημαντικά υψηλότερη ενέργεια της διεργασίας δύο σταδίων P/VSA σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος εξοπλισμού των διεργασιών προσρόφησης την κάνουν να έχει πολύ μεγάλο τελικό κόστος. Η διεργασία P/VSA ενός σταδίου και η συνδυασμένη διεργασία παρουσιάζουν πρακτικά ίδια απαίτηση σε ενέργεια. Ωστόσο, με την ενδεχόμενη ανάπτυξη υλικών μεμβρανών με μεγαλύτερες τιμές εκλεκτικότητας, η συνδυασμένη διεργασία πιθανώς να είναι προτιμότερη σε όρους ενέργειας στο μέλλον.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το ερευνητικό έργο υποστηρίχθηκε από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.) στο πλαίσιο της δράσης «1^η προκήρυξη ερευνητικών έργων ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για την ενίσχυση των μελών ΔΕΠ και Ερευνητών/τριών και την προμήθεια ερευνητικού εξοπλισμού μεγάλης αξίας» (Αριθμός Έργου: 2090)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Metz B, Davidson O, de Coninck H, Loos M, Meyer L. (2005). *IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage*.
- [2] Subraveti S, Roussanaly S, Anantharaman R, Riboldi L, Rajendran A. (2022). *Appl. Energy*, 306, 117955.
- [3] Abu-Zahra M, Schneiders L, Niederer J, Feron P, Versteeg G. (2007). *Int. J. Greenh. Gas Control*, 1, 37-46.
- [4] Khurana M, Farooq S. (2017). *AIChE J.*, 63, 2987-2995
- [5] Haghpanah R, Nilam R, Rajendran A, Farooq S, Karimi I. (2013). *AIChE J.*, 59, 4735-4748
- [6] Chatziasteriou C, Kikkinides E, Georgiadis M. (2022). *Comput. Chem. Eng.*, 165, 107938.
- [7] Chatziasteriou C, Georgiadis M, Kikkinides E. (2023). *Comput. Aided Chem. Eng.*, 2771-2776.
- [8] Koutsonikolas D, Pantoleontos G, Karagiannakis G, Konstandopoulos A. (2021). *Sep. Purif. Technol.*, 264, 118432.
- [9] Haghpanah R, Rajendran A, Farooq S, Karimi I. (2014). *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53, 9186-9198.