

# Μαθηματική μοντελοποίηση και προσομοίωση διεργασιών προσρόφησης με εναλλαγή πίεσης/κενού (P/VSA) για την παραγωγή οξυγόνου υψηλής καθαρότητας από τον ατμοσφαιρικό αέρα

A. Χαραλαμπους<sup>1</sup>, Ε. Σ. Κικκινίδης<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, 54124, Θεσσαλονίκη

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάται η διεργασία προσρόφησης με εναλλαγή πίεσης/κενού (P/VSA), για την παραγωγή οξυγόνου (O<sub>2</sub>) υψηλής καθαρότητας (>90%) από τον ατμοσφαιρικό αέρα, σε ένα σύστημα δύο κλινών με προσροφητικό υλικό. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε λεπτομερές μαθηματικό μοντέλο το οποίο επιλύθηκε, μέσα από την υπολογιστική πλατφόρμα MATLAB. Αρχικά έγινε ένας έλεγχος αξιοπιστίας του μοντέλου και σύγκριση με βιβλιογραφικές τιμές και στη συνέχεια έγιναν προσομοιώσεις όπου μελετήθηκε η επίδραση διάφορων σχεδιαστικών παραμέτρων στους δείκτες απόδοσης της διεργασίας όπως είναι η καθαρότητα και ανάκτηση του τελικού προϊόντος O<sub>2</sub>, ο βαθμός μεγέθους της κλίνης, BSF, ο οποίος είναι αντιστρόφως ανάλογος της παραγωγικότητας της διεργασίας, και η καταναλισκόμενη ενέργεια. Επιπλέον εξετάστηκαν δυο διαφορετικοί τύποι ζεόλιθου ως προσροφητικά υλικά που χρησιμοποιούνται για το συγκεκριμένο διαχωρισμό καθώς και διάφοροι κύκλοι διεργασιών P/VSA με διαφορετικό αριθμό σταδίων με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης της διεργασίας.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μια σημαντική αύξηση σε εφαρμογές τεχνολογιών διαχωρισμού αερίων με φυσικές διεργασίες προσρόφησης, όπως η προσρόφηση με εναλλαγή πίεσης/κενού (Pressure/Vacuum Swing Adsorption, P/VSA) αλλά και στην έρευνα γύρω από αυτές. Η συγκεκριμένη διεργασία βρίσκει πολύ μεγάλη εφαρμογή σε βιομηχανική κλίμακα για το διαχωρισμό αερίων μιγμάτων σε διάφορες τιμές πίεσης και θερμοκρασίας και για μέτριες παροχές τροφοδοσίας όπου και πλεονεκτεί έναντι πιο παραδοσιακών αλλά ενεργοβόρων μεθόδων διαχωρισμού όπως είναι η απόσταξη και η απορρόφηση<sup>[1]</sup>. Για παράδειγμα κατά την παραγωγή οξυγόνου (O<sub>2</sub>) υψηλής καθαρότητας (>90%) από τον ατμοσφαιρικό αέρα η μέθοδος P/VSA πλεονεκτεί της κρουογενικής απόσταξης για απαιτήσεις σε παραγωγή O<sub>2</sub> έως και 60 tn ημερησίως<sup>[1]</sup>.

## ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ένας απλός κύκλος PSA ή κύκλος Skastrom αποτελείται από τέσσερα στάδια, το στάδιο προσρόφησης, το στάδιο της αποσυμπίεσης με αντιρροή, το στάδιο καθαρισμού της κλίνης προσρόφησης και το στάδιο της συμπίεσης<sup>[1]</sup>. Ο καθαρισμός της κλίνης στη περίπτωση μας γίνεται με χρήση μέρους του προϊόντος που παράγεται, ενώ η συμπίεση με χρήση μίγματος τροφοδοσίας. Σύμφωνα με το μηχανισμό που περιγράφει τη διεργασία, ένα ή περισσότερα συστατικά του αερίου μίγματος προσροφώνται εκλεκτικά στους νανοπόρους του προσροφητικού υλικού σε μία κλίνη προσρόφησης, με αποτέλεσμα να παράγεται ένα αέριο μίγμα εμπλουτισμένο με το ασθενές προσροφημένο συστατικό του αερίου τροφοδοσίας. Στην συνέχεια η κλίνη προσρόφησης αναγεννάται μέσω εκρόφησης των προσροφημένων συστατικών σε πίεση χαμηλότερη από αυτή της τροφοδοσίας. Έτσι η συνολική πίεση του συστήματος μεταβάλλεται μεταξύ της υψηλής πίεσης στη τροφοδοσία της κλίνης και της χαμηλής πίεσης κατά το στάδιο της αναγέννησης της κλίνης<sup>[1]</sup>.

Η απόδοση της διεργασίας PSA αξιολογείται από διάφορους δείκτες όπως, η καθαρότητα και η ανάκτηση του ασθενώς προσροφημένου συστατικού που αποτελεί συνήθως το προϊόν της

διεργασίας (O<sub>2</sub>), ο βαθμός μεγέθους της κλίνης (Bed Size Factor, BSF) ο οποίος σχετίζεται με την απαιτούμενη ποσότητα προσροφητικού υλικού και είναι αντιστρόφως ανάλογος της παραγωγικότητας της διεργασίας και η ενέργεια που καταναλώνεται κατά της διεργασία.

Η ανάγκη βελτίωσης των παραπάνω δεικτών απόδοσης οδήγησε στη δημιουργία σύνθετων κύκλων P/VSA. Αρχικά προστέθηκε ένα επιπλέον στάδιο όπου γίνεται μερική αποσυμπίεση της κλίνης κατά ομορροή με το στάδιο της προσρόφησης (κύκλος 5 σταδίων). Εναλλακτικά, προστίθενται στο κύκλο δύο στάδια εξισορρόπησης πίεσης μεταξύ των δύο κλινών κατά αντιρροή ή κατά ομορροή (κύκλος 6 σταδίων). Τα προσροφητικά υλικά που χρησιμοποιούνται είναι NaX και LiX. Οι χρόνοι για κάθε στάδιο είναι 30 s, ενώ τα στάδια εξισορρόπησης της πίεσης 15 s. Επίσης η ενδιάμεση πίεση για το κύκλο ο οποίος περιέχει τα στάδια εξισορρόπησης της πίεσης, δεν είναι γνωστή εξαρχής, και για αυτό το λόγο υπολογίζεται επαναληπτικά με μία απλοποιημένη μέθοδο σκόπευσης. Σε όλες τις προσομοιώσεις ξεκινάμε έχοντας κορεσμένη κλίνη ως αρχική συνθήκη. Τα βασικά χαρακτηριστικά της κλίνης πάρθηκαν από την βιβλιογραφία<sup>[4]</sup> και έχουν ως εξής : μήκος κλίνης 2.0m, η διάμετρος κλίνης 1.0m, πορώδες κλίνης 0.4 και πυκνότητα κλίνης 720kg/m<sup>3</sup>.

Το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη διεργασία είναι ένα πεπλεγμένο σύστημα που αποτελείται από αλγεβρικές, μερικές και συνήθεις διαφορικές εξισώσεις. Οι εξισώσεις, οι συνοριακές και αρχικές συνθήκες που αναφέρονται στα λειτουργικά στάδια της διεργασίας<sup>[2]</sup> παρατίθενται στη συνέχεια.

#### Μερικό ισοζύγιο μάζας

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} = D_z c \frac{\partial^2 y_1}{\partial z^2} - u \frac{\partial c_1}{\partial z} - c_1 \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{(1 - \varepsilon_b)}{\varepsilon_b} \alpha_b N_1 \quad (1) \quad \text{και} \quad y_1 = \frac{c_1}{c} \quad (2)$$

#### Ολικό Ισοζύγιο Μάζας

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial x} - c \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{(1 - \varepsilon_b)}{\varepsilon_b} \alpha_b (N_1 + N_2) \quad (3)$$

#### Ισοζύγιο ενέργειας

$$\left[ 1 + \frac{(1 - \varepsilon_b) \rho_p c_{ps}}{\varepsilon_b \rho_g c_{pg}} + \frac{(1 - \varepsilon_b) \rho_p c_{pg} \sum_{j=1}^2 q_j}{\varepsilon_b \rho_g c_{pg}} \right] \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_b \rho_g c_{pg}} \frac{\partial P}{\partial t} \\ = \frac{\lambda_e}{\varepsilon_b \rho_g c_{pg}} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - u \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{(1 - \varepsilon_b) \rho_p}{\varepsilon_b \rho_g c_{pg}} - \frac{h_w \alpha_w}{\varepsilon_b \rho_g c_{pg}} (T - T_w) \quad (4)$$

#### Διάχυση στους πόρους

$$\varepsilon_p \frac{dc_{pi}}{dt} + \rho_p \frac{dq_i}{dt} = \alpha_b N_i \quad (5) \quad \alpha_b N_i = \alpha_b k_i (c_i - c_{pi}) \quad (6) \quad \frac{dq_i}{dt} = k_{ci} (q_i^* - q_i) \quad (7) \\ i = 1,2$$

#### Ισοζύγιο ορμής - εξίσωση Ergun

$$\varepsilon_b \rho_g \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial z} \right] = -\varepsilon_b \frac{\partial P}{\partial z} - \varepsilon_b^2 \frac{150 \mu (1 - \varepsilon_b)^2}{4 R_p^2 \varepsilon_b^3} - \varepsilon_b^3 \frac{1.75 (1 - \varepsilon_b)^3}{2 R_p \varepsilon_b^3} \rho_g |u| u \quad (8)$$

#### Ισόθερμοι προσρόφησης

$$q^* = \frac{K_i P_i}{1 + \sum_{j=1}^2 B_j P_j}, \quad i = 1,2 \quad (9)$$

## Συνοριακές συνθήκες

Για το μερικό ισοζύγιο μάζας εφαρμόζονται οι συνοριακές συνθήκες Danckwert's

$$D_z c \frac{\partial y_1}{\partial z} = u_{z=z_1} (c_1 - c_{z=z_1}) \quad z = z_1 \quad (10) \quad \text{και} \quad \frac{\partial c_1}{\partial z} = 0 \quad z = z_2 \quad (11)$$

$$-\lambda_L \frac{\partial T_i}{\partial z} = \rho_g C \rho_g u_{z=z_1} (T - T_{z=z_1}) \quad z = z_1 \quad (12) \quad \text{και} \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad z = z_2 \quad (13)$$

Όπου  $z_1$  είναι η είσοδος και  $z_2$  η έξοδος της κλίνης ( $z_1=0, z_2=L$ , σε ομορροή και  $z_1=L, z_2=0$ , σε αντιρροή).

Η ταχύτητα λαμβάνει σταθερή τιμή είτε στην είσοδο είτε στην έξοδο της κλίνης (συνοριακή συνθήκη Dirichlet) ενώ η πίεση λαμβάνει σταθερή ή μεταβλητή με το χρόνο τιμή στην αντίθετη με την ταχύτητα θέση της κλίνης για λόγους που έχουν αναλυθεί στη βιβλιογραφία<sup>[3]</sup>. Η πίεση για τα στάδια τα οποία μεταβάλλεται δίνεται από μια εκθετική σχέση της μορφής:

$$P(t) = P_f + (P_0 - P_f)e^{-at} \quad (14)$$

Όπου  $P_0, P_f$ , είναι οι τιμές της πίεσης στην αρχή και στο τέλος του σταδίου, αντίστοιχα,  $t$ , είναι ο χρόνος που «τρέχει» για το συγκεκριμένο στάδιο (επομένως είναι 0 στην αρχή του σταδίου) και  $a$  είναι ένας συντελεστής που σχετίζεται με τον ρυθμό αύξησης ή μείωσης της πίεσης.

## Αρχικές συνθήκες

Οι τιμές για κάθε σημείο στο χώρο στο τέλος του κάθε σταδίου ορίζονται ως αρχικές συνθήκες για κάθε σημείο στο χώρο σε χρόνο μηδέν για το επόμενο στάδιο.

Αρχικά γίνεται ένας έλεγχος αξιοπιστίας του μαθηματικού μοντέλου με δεδομένα από την βιβλιογραφία. Για τον έλεγχο αυτό χρησιμοποιείται κύκλος με 5 σταδίων όπου μετά το στάδιο της προσρόφησης ακολουθεί ένα στάδιο μερικής αποσυμπίεσης κατά ομορροή μετά το στάδιο της προσρόφησης. Επίσης χρησιμοποιήθηκε μοντέλο ισορροπίας, δηλαδή οι συντελεστές μεταφοράς μάζας διαμέσου των μακροπόρων του υλικού θεωρούνται απείρως μεγάλοι. Όλες οι παράμετροι για το μοντέλο ισορροπίας πάρθηκαν από την βιβλιογραφία, τόσο για το προσροφητικό υλικό  $\text{NaX}^{[4]}$  όσο και για το προσροφητικό υλικό  $\text{LiX}^{[5]}$ .

Στην συνέχεια, γίνονται προσομοιώσεις για τα τρία είδη κύκλων επίσης υπό συνθήκες ισορροπίας, για το υλικό  $\text{LiX}$ , μεταβάλλοντας την ταχύτητα του αερίου που εισέρχεται στο στάδιο του καθαρισμού της κλίνης και μελετάται η επίπτωση αυτής της μεταβολής στους δείκτες απόδοσης της διεργασίας.

Τέλος εισάγονται οι όροι της διάχυσης στο μοντέλο όπως επίσης και ο υπολογισμός της ενέργειας που καταναλώνεται και έγιναν προσομοιώσεις, για τον κύκλο Skastrom και τον κύκλο με τα στάδια εξισορρόπησης της πίεσης κατά αντιρροή, μεταβάλλοντας την ακτίνα του προσροφητικού υλικού και μελετάται η επίπτωση αυτής της μεταβολής στους δείκτες απόδοσης της διεργασίας που έχουν προαναφερθεί. Και εδώ οι παράμετροι για το μοντέλο αλλά και ο τρόπος υπολογισμού των αδιάστατων όρων πάρθηκαν από τη βιβλιογραφία.<sup>[4][5]</sup>

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Αρχικά το μοντέλο αξιολογήθηκε με βάση δεδομένα από τη βιβλιογραφία<sup>[4][5]</sup>. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με βάση τους δείκτες απόδοσης της διεργασίας παρατίθενται στον Πίνακα 1, όπου  $P_H$  (bar) η πίεση του αερίου τροφοδοσίας,  $P_{CD}$ (bar) η πίεση στο τέλος του σταδίου μερικής

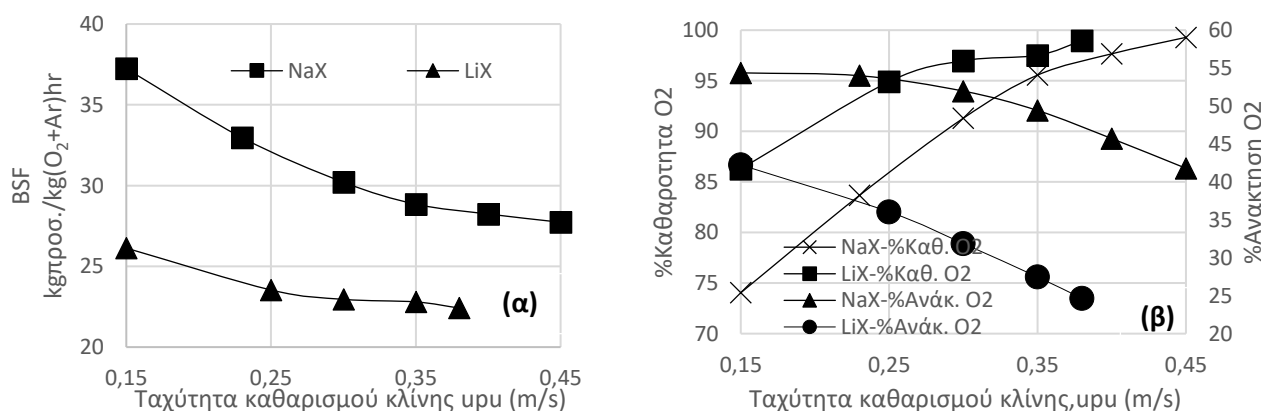
αποσυμπίεσης,  $u_F$  (m/s) η ταχύτητα του αερίου τροφοδοσίας,  $u_{pu}$  (m/s) η ταχύτητα του αερίου που εισέρχεται στο στάδιο καθαρισμού και  $P_L$  (bar) η πίεση στο στάδιο του καθαρισμού.

**Πίνακας 1:** Αποτελέσματα για έλεγχο αξιοπιστίας του μοντέλου

Κύκλος με το στάδιο της μερικής αποσυμπίεσης								
Βιβλιογραφικά αποτελέσματα για NaX <sup>[4]</sup>								
$P_H$ (bar)	$P_{CD}$ (bar)	$P_H/P_L$ (-)	$u_F$ (m/s)	$u_{pu}$ (m/s)	%Καθαρότητα O <sub>2</sub> +Ar	%Ανάκτηση O <sub>2</sub> +Ar	BSF (kgπροσ./kg(O <sub>2</sub> +Ar)hr)	
1	0.7	5	0.23	0.4	95.6	53.4	37.4	
Αποτελέσματα εργασίας για NaX								
1	0.7	5	0.23	0.4	95.7	55.8	37.7	
Βιβλιογραφικά αποτελέσματα για LiX <sup>[5]</sup>								
1	0.7	3	0.48	0.38	96.11	62.03	20.66	
1.2	0.7	3	0.40	0.38	90.68	78.02	15.84	
Αποτελέσματα εργασίας για LiX								
1	0.7	3	0.48	0.38	95.11	62.19	18.93	
1.2	0.7	3	0.40	0.38	89.32	77.96	15.33	

Οι προσομοιώσεις έγιναν για αμελητέα πτώση πίεσης για να συμφωνεί με την βιβλιογραφία. Από τα αποτελέσματα του πίνακα 1 φαίνεται ότι και για τα δύο προσροφητικά υλικά τα αποτελέσματα από το μοντέλο μας βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τις βιβλιογραφικές τιμές με τυχόν μικρές αποκλίσεις να θεωρούνται αμελητέες.

Στη συνέχεια έγινε σύγκριση των προσροφητικών υλικών NaX, LiX μέσα από παραμετρική μελέτη για τον απλό κύκλο 4-σταδίων Skarstrom. Τα αποτελέσματα της επίδρασης της ταχύτητας καθαρισμού  $u_{pu}$ , στην παραγωγικότητα (BSF) εμφανίζονται στο σχήμα 1(α), ενώ αυτά της επίδρασης της ταχύτητας καθαρισμού  $u_{pu}$ , στην καθαρότητα και ανάκτηση του O<sub>2</sub> εμφανίζονται στο σχήμα 1(β).

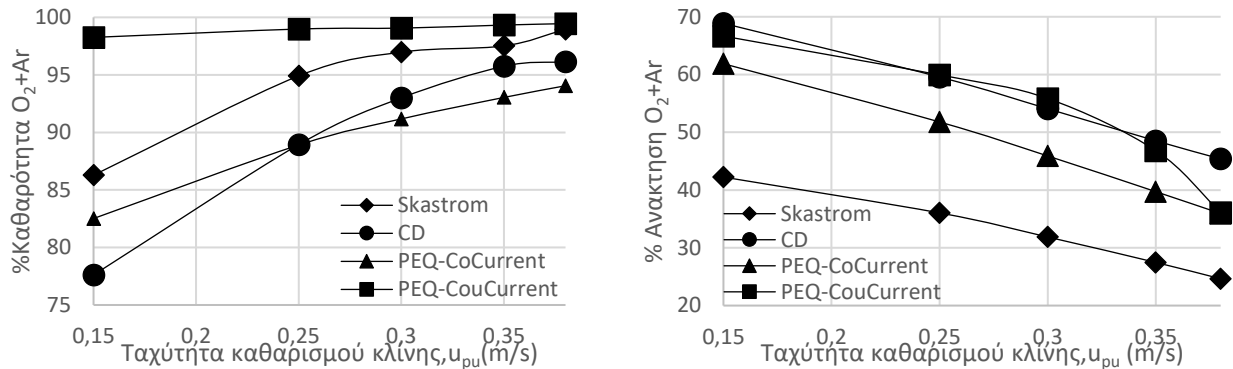


**Σχήμα 1:** Επίδραση της μεταβολής της ταχύτητας καθαρισμού  $u_{pu}$ , (α) στον παράγοντα μεγέθους κλίνης και (β) στην καθαρότητα και ανάκτηση του O<sub>2</sub> για τα δύο προσροφητικά ( $P_H=1\text{bar}$ ,  $P_H/P_L=5$  για το NaX και  $P_H/P_L=3$  για το LiX).

Από τα αποτελέσματα στο σχήμα 1, διαπιστώνεται ότι το προσροφητικό LiX οδηγεί σε υψηλότερες τιμές καθαρότητας, αλλά σε χαμηλότερη ανάκτηση του προϊόντος O<sub>2</sub>. Επίσης ο παράγοντας μεγέθους κλίνης (BSF) που ορίζεται ως το αντίστροφο της παραγωγικότητας μειώνεται με χρήση του LiX ως προσροφητικό σε σύγκριση με το προσροφητικό NaX όπως ήταν αναμενόμενο. Αυτό υποδηλώνει ότι για ένα κιλό παραγόμενου οξυγόνου απαιτείται μικρότερη ποσότητα προσροφητικού υλικού LiX από ότι NaX, πράγμα που υποδηλώνει και μεγαλύτερη παραγωγικότητα.

Με βάση τα παραπάνω η μελέτη στη συνέχεια επικεντρώθηκε στο προσροφητικό υλικό LiX. Αρχικά εξετάστηκαν πέραν του κύκλου Skarstrom και πιο σύνθετοι κύκλοι όπως ο κύκλος 5-σταδίων με

επιπλέον προσθήκη του σταδίου αποσυμπίεσης σε ομορροή μετά το στάδιο της προσρόφησης καθώς και 2 κύκλοι 6-σταδίων με εξισορρόπηση της πίεσης. Στις προσομοιώσεις αυτές εξακολουθεί να ισχύει η υπόθεση ισορροπίας (διότι αυτή καθορίζει τους μέγιστους δείκτες απόδοσης της διεργασίας). Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται η επίδραση της ταχύτητας καθαρισμού  $u_{pu}$  στην καθαρότητα και ανάκτηση του προϊόντος  $O_2$ .



**Σχήμα 2:** Επίδραση της μεταβολής της ταχύτητας καθαρισμού  $u_{pu}$ , (α) στον καθαροτητα και (β) στην ανάκτηση του  $O_2$  για το υλικό LiX ( $P_H=1\text{bar}$ ,  $P_H/P_L=3$ ).

Παρατηρείται ότι αύξηση της ταχύτητας καθαρισμού έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της καθαρότητας του παραγόμενου οξυγόνου σε κάθε επιμέρους κύκλο. Αυτό οφείλεται στο ότι η αύξηση της ταχύτητας συνεπάγεται και αύξηση της παροχής του αερίου καθαρισμού που οδηγεί σε καλύτερο καθαρισμό της κλίνης. Αντίθετα η ανάκτηση του παραγόμενου προϊόντος μειώνεται, καθώς, αυξάνοντας την παροχή του αερίου που χρησιμοποιείται για το καθαρισμό της κλίνης μειώνεται η ποσότητα του αερίου που λαμβάνεται ως προϊόν.

Η προσθήκη των σταδίων εξισορρόπησης της πίεσης στο κύκλο ή και του σταδίου μερικής αποσυμπίεσης κατά ομορροή οδηγεί σε σημαντική αύξηση της ανάκτησης του παραγόμενου οξυγόνου σε σύγκριση με τον απλό κύκλο Skastrom όπως φαίνεται από το σχήμα 2 σε πλήρη συμφωνία με συναφή αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία.

Τέλος με την εισαγωγή των φαινομένων μεταφοράς μάζας και ορμής μελετήθηκε η επίδραση τους στην απόδοση της διεργασίας. Στην περίπτωση αυτή κρατήσαμε όλες τις παραμέτρους ίδιες, επιλέχθηκε ως πίεση λειτουργίας 1.2 bar και μεταβάλαμε μόνο το μέγεθος των κόκκων του προσροφητικού υλικού μέσω της ακτίνας του κόκκου,  $R_p$ , διότι αυτή επηρεάζει τόσο τη μεταφορά μάζας όσο και τη μεταφορά ορμής στην κλίνη προσρόφησης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

**Πίνακας 2:** Αποτελέσματα μοντέλου μη ισορροπίας

Κύκλος 6 σταδίων με εξισορρόπηση πίεσης κατά αντήρροή						
$R_p$ (mm)	%Καθαρότητα $O_2+Ar$	%Ανάκακτηση $O_2+Ar$	BSF (kgπροσ./kg( $O_2+Ar$ )hr)	$Peq$ (bar)	Ενέργεια (kWh/kgπαρ. $O_2$ )	Πτώση πίεσης (bar)
1	96.72	72.85	24.19	0.75	74.89	0.01
0.75	98.30	72.57	23.98	0.75	76.25	0.02
0.5	98.87	70.84	24.46	0.75	80.14	0.04
0.25	97.18	60.75	27.80	0.79	96.70	0.16
Κύκλος Skastrom						
1	83.02	42.90	22.95	-	108.57	0.01
0.75	85.83	43.18	22.34	-	111.45	0.02
0.5	88.11	42.65	22.34	-	120.28	0.04
0.25	90.12	36.03	24.62	-	157.32	0.16

Με την προσθήκη των όρων της διάχυσης στο μοντέλο μειώνονται η καθαρότητα αλλά και η ανάκτηση του προϊόντος σε σύγκριση με το μοντέλο ισορροπίας. Η μείωση της ακτίνας του προσροφητικού υλικού LiX δεν οδηγεί σε μια μονότονη μεταβολή των δεικτών απόδοσης διεργασίας.

Ο λόγος είναι ότι καθώς το μέγεθος του κόκκου μειώνεται, αυξάνεται ο ρυθμός διάχυσης στους μακροπόρους του υλικού και επομένως προσεγγίζεται καλύτερα η συνθήκη ισορροπίας η οποία μεγιστοποιεί την απόδοση της διεργασίας. Από την άλλη πλευρά όμως αυξάνει και η πτώση πίεσης στην κλίση η οποία από την πλευρά της οδηγεί σε μείωση της απόδοσης και αύξηση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Τέλος συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από το κύκλο Skarstrom σε σχέση με αυτά από τον κύκλο 6 σταδίων, φαίνεται η σημαντική μείωση στην καταναλισκόμενη ενέργεια εξαιτίας των σταδίων εξισορρόπησης της πίεσης τα όποια μειώνουν σημαντικά τις ενεργειακές απαιτήσεις της διεργασίας. Επιπλέον, η ανάκτηση του O<sub>2</sub> με τον κύκλο 6-σταδίων είναι πολύ μεγαλύτερη (σχεδόν διπλάσια) σε σχέση με τον απλό κύκλο Skarstrom σε συμφωνία με αντίστοιχες δημοσιευμένες εργασίες [6].

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε προσομοιάζει επαρκώς τη διεργασία προσρόφησης με εναλλαγή πίεσης έχοντας πολύ καλή συμφωνία με βιβλιογραφικά δεδομένα. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την ανωτερότητα του προσροφητικού υλικού LiX έναντι του NaX ενώ καταδεικνύουν την ανάγκη χρήσης σύνθετων κύκλων με στάδια εξισορρόπησης της πίεσης. Η χρήση ρεαλιστικών μοντέλων που περιλαμβάνουν τα φαινόμενα μεταφοράς στους πόρους του προσροφητικού υλικού οδηγεί στην ανάγκη βελτιστοποίησης της διεργασίας σε σχέση με το μέγεθος του κόκκου του προσροφητικού υλικού.

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] R.T. Yang, Butterworth Boston, Reprinted by Imperial College Press. London and World Scientific Publishing Co. River Edge. NJ 1997a.
- [2] D. Nikolic, A. Giovanoglou, M.C. Georgiadis, E.S. Kikkinides, *Ind. and Eng. Chem. Res.*, 47(9) (2008) 3156-3169.
- [3] E.S. Kikkinides, R.T. Yang, *Chem. Eng. Sc.* 48(9) (1993) 1545-1555.
- [4] S.U. Rege, R.T. Yang, *Ind. and Eng. Chem. Res* 36(12) (1997) 5358-5365.
- [5] N.D. Hutson, S.U. Rege, R.T. Yang, *AIChE* 45(4) (1999) 724-734.
- [6] B.D. Crittenden, J. Guan, W.N. NG, W.J. Thomas, *Chem. Eng. Sc.* 49(16) 2657-2665.