

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București
Facultatea de Energetică
Departamentul de Producere și Utilizare a Energiei
Școala doctorală de Energetică



Modelarea, simularea și analiza economică
a integrării sistemelor de membrană și
hibride pentru captarea de CO₂

Teza de doctorat susținută în vederea îndeplinirii cerințelor Universității
Naționale de Știință și Tehnologie Politehnica București, pentru
obținerea gradului de doctor în Inginerie Energetică

Ing. MAYTHAM ODAY MOHAMMED SALIH ALABID

PhD Coordonator: Prof. Dr. Ing. Cristian DINCA

Romania, București, 2024

Rezumat

Cuvinte cheie: parametrizarea procesului membranar; captare CO₂; analiză tehnico-economică; integrare proces; gazeificare; centrală termoelectrică

Capitolul 1 – Introducere

Creșterea demografică, urbanizarea rapidă și creșterea producției, în special în statele sărace, au dus la creșterea emisiilor de dioxid de carbon stimulate de activitatea umană. Potrivit datelor din Our World in Data, gazele cu efect de seră (GES) sunt produse în jur de 50 de miliarde de tone în fiecare an, din care 73,2% din emisiile totale sunt generate din utilizarea energiei, 18,4% din agricultură și silvicultură, iar ultimele 8,4% sunt produse de deșeuri și industrie. Modificările intensive în sectoarele energetice și domestice vor fi fundamentale pentru reducerea nivelului atmosferic al dioxidului de carbon. Un studiu unic despre încălzirea globală de 1,5°C a fost publicat de Panelul Interguvernamental pentru Schimbările Climatice (IPCC) în octombrie 2018, care a demonstrat influența încălzirii globale printr-o creștere de 1,5°C a temperaturii medii, care este cauzată ca urmare a emisiilor de gaze cu efect de seră. Pentru a atinge obiectivul acordat, emisiile totale de dioxid de carbon trebuie reduse cu aproximativ 45% față de nivelul din 2010 până în 2030 și să nu se mai genereze alte emisii în 2050. Au fost cercetate mai multe soluții referitoare la această criză, cum ar fi migrarea producției de energie de la combustibilii fosili la sursele regenerabile, îmbunătățirea eficienței energetice a instalațiilor existente și integrarea metodelor de captare și stocare a carbonului (CCS) în sectoarele de producere a energiei.

Capitolul 2 – Sisteme de captare CO₂

Există trei rute comune pentru recuperarea CO₂ din facilitățile industriale și din aplicațiile bazate pe utilizarea de combustibili fosili precum petrolul, cărbunele, biomasa și gazele naturale:

procesul de post-combustie, procesul de pre-combustie și procesul de oxico-combustie. În figura 1 se prezintă schema proceselor considerate pentru captarea de CO₂.

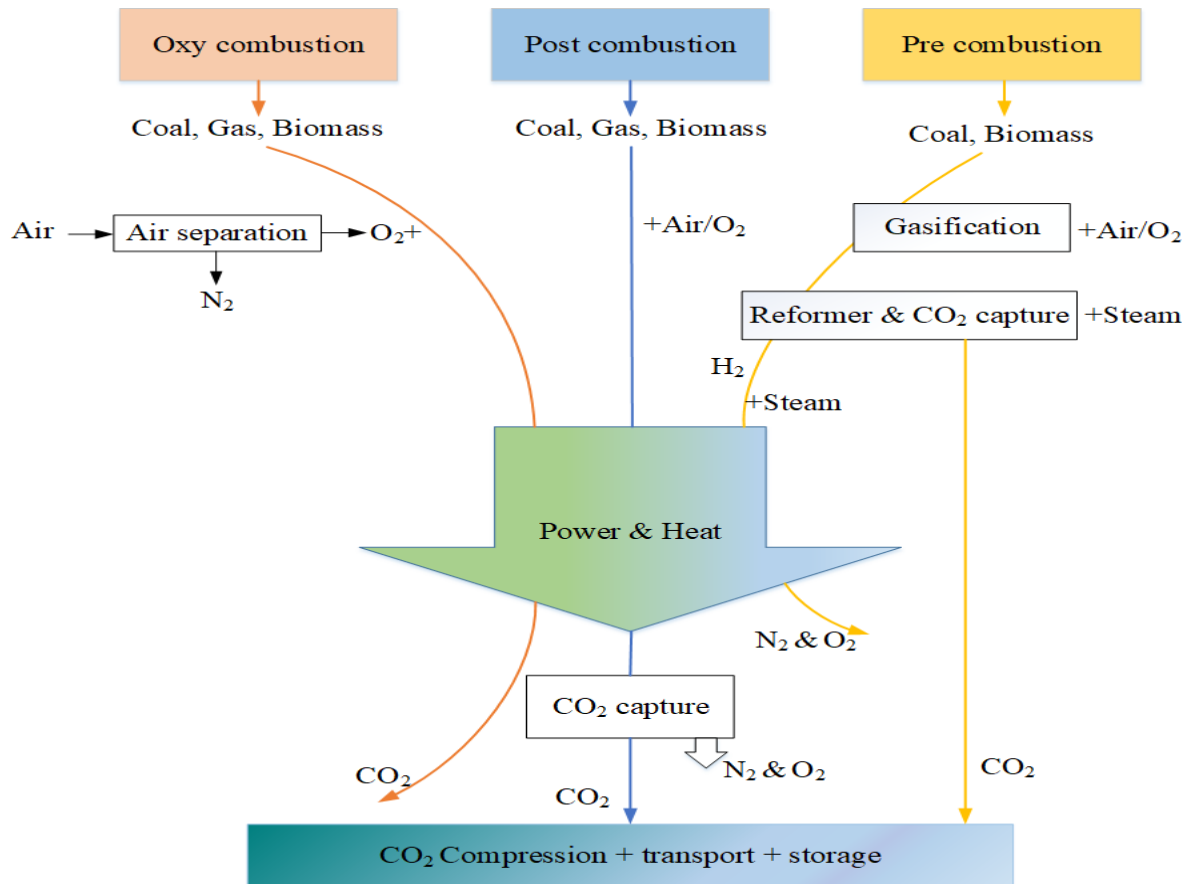


Figura 1. Diferite sisteme de captare CO₂.

Procesul de post-combustie implică reținerea CO₂ din gazele de ardere rezultate din arderea combustibililor. Acest proces este integrat în centralele electrice existente fără a face modificări majore, având astfel avantajul că este mai ușor de adaptat decât celelalte metode CC(U)S. În procesul post-combustie, un precipitator electrostatic (ESP) este integrat pentru a elimina toate particulele de praf din gazele de ardere evacuate din generatorul de abur. Ulterior, se utilizează o coloană de desulfurizare (FGD) pentru îndepărtarea produselor secundare de sulf. Tehnologia de captare a CO₂ prin metode post-combustie este concepută pentru a purifica gazele de ardere tratate evacuate din echipamentul FGD. Recent, în literatura de specialitate există numeroase studii care s-au concentrat

pe utilizarea tehnologiilor CCS de post-combustie, în care se arată că tehnologia post-combustie prezintă un potențial ridicat de captare de CO₂ din diferite amestecuri de gaze.

Procesul pre-combustie reprezintă o altă soluție pentru reținerea de CO₂ din sisteme energetice. Combustibilul solid (biomasă, deșeuri, cărbune, etc.) este inițial transformat în gaz de sinteză care este ulterior folosit pentru producția de energie electrică și/sau termică. Înainte de procesul de ardere, dioxidul de carbon, generat din arderea combustibililor fosili, este extras și recuperat. Conceptul de pre-combustie implică îndepărtarea CO₂ înainte de procesul de ardere, unde gazul de sinteză este generat prin gazificarea combustibilului solid cu oxigen/aer sau abur. Concentrația volumică de CO₂ în gazul de sinteză variază între 15 și 60%, prin urmare, este necesar un consum redus de energie în comparație cu procesul de post-combustie. Cu toate acestea, separarea O₂ din aer și procesele de oxidare/gazificare pot crește cerințele de energie în sistemul actual. În prezent, literatura de specialitate se concentrează pe exploatarea procesului de captare CO₂ pre-combustie pentru a fi utilizat în Ciclul Combinat cu Gazificare Integrată (IGCC).

În procesul de oxico-combustie, un flux de oxigen foarte concentrat (cu o puritate de 95-99%) este introdus drept comburant în loc de aer împreună cu combustibilul primar; oxigenul este separat de N₂ printr-o membrană sau prin metoda criogenică. Astfel, gazele de ardere rezultate au în mod obișnuit concentrații ridicate de vapori de apă și dioxid de carbon (80%), iar vaporii de apă sunt îndepărtați prin răcire și condensare, lăsând un flux pur de CO₂. Costul operațional ridicat al generării de O₂ și comprimarea dioxidului de carbon după combustie este principalul dezavantaj al acestei metode.

Diverse metode au fost cercetate pentru a minimiza emisiile de CO₂ din diferite procese, inclusiv înlocuirea combustibilului cu un conținut mare de CO₂ cu unul mai redus, trecerea la energie regenerabilă din surse fosile, îmbunătățirea eficienței instalațiilor și utilizarea tehnologiilor de captare a CO₂-ului. Absorbția, adsorbția, membranele, metodele criogenice și hibride pot fi toate utilizate

pentru captarea dioxidului de carbon, în funcție de instalația generatoare de CO₂. Procesele de absorbție ale captării CO₂ se bazează pe interacțiunea chimică a solventului cu CO₂ pentru a produce substanțe chimice reziduale. Absorbția chimică și fizică sunt denumirile proceselor ce utilizează solvenți fizici și chimici. Procesul de absorbție chimică (CAP) al recuperării CO₂ depinde de reacția exotermică a unui solvent cu CO₂ care există în gazele de ardere, preferabil la temperaturi scăzute. Ulterior, la temperaturi ridicate, reacția este ireversibilă în cadrul coloanei de "desorbție" sau "regenerare". Această metodă funcționează în special pentru recuperarea dioxidului de carbon la presiuni reduse, apropiate de cea atmosferică, unde solvenții cei mai utilizați sunt soluțiile de amine sau de carbonați. Cea mai apropiată metodă comercial disponibilă și extrem de eficientă de eliminare și stocare a CO₂-ului este procesul de post-combustie. Cel mai cunoscut solvent este cel pe bază de amine, monoetanolamina (MEA), evidențiindu-se pentru costul său accesibil și reacția chimică puternică cu dioxidul de carbon. Un alt avantaj al acestei tehnologii constă în faptul că este potrivită pentru modernizarea centralelor electrice existente. Cu toate acestea, această tehnologie are multe dezavantaje, cum ar fi capacitatea redusă de absorbție a CO₂-ului, dimensiunea mare a echipamentelor, degradarea aminei prin existența gazelor acide în gazele de ardere și o rată mare de coroziune a echipamentelor, și în plus consumul mare de energie în timpul procesului de regenerare.

Absorbția fizică este descrisă de Legea lui Henry, unde presiunea mare a dioxidului de carbon și temperatura scăzută permit gazului să fie absorbit și poate fi desorbit prin reducerea presiunii și creșterea temperaturii. Dezavantajul principal al utilizării acestei metode este energia electrică necesară pentru comprimarea gazului de alimentare la presiuni ridicate. Anumite utilizări, precum captarea carbonului din gazele naturale, nu pot fi afectate de această provocare, deoarece fluxul de gaz nu trebuie să fie comprimat acesta fiind evacuat la o presiune mare (mai mare de 100 de bar).

Adsorbția este o altă modalitate de a capta dioxidul de carbon din gazele de alimentare furnizate de diferite surse. Spre deosebire de procesele de absorbție care utilizează solvenți lichizi,

procesul de adsorbție folosește un sorbent solid pentru a capta dioxidul de carbon pe stratul său exterior. Unul dintre dezavantajele acestui proces este că nu poate trata niveluri extrem de ridicate de dioxid de carbon, care sunt în mod tipic între 0,04% - 1,5%. Majoritatea stațiilor de energie conțin gaze de ardere cu concentrații volumice de aproximativ 15% dioxid de carbon. Al doilea este că adsorbția se desfășoară lent. Un alt dezavantaj este că sorbenții existenți, a căror capacitate depinde de dimensiunea porilor, nu sunt suficient de selectivi pentru a separa dioxidul de carbon din gazele de alimentare.

Procesul de separare a gazelor prin membrană este considerat a fi o metodă aplicabilă și optimistă pentru reducerea dioxidului de carbon care poate concura cu procesele convenționale de separare a CO₂ în ceea ce privește penalitățile energetice și prețul. Tehnologia membranelor este atractivă pentru recuperarea dioxidului de carbon datorită caracteristicilor sale, cum ar fi structura simplă, energia curată și natura prietenoasă cu mediul înconjurător. Dezavantajul fundamental al membranelor este că performează mai slab la concentrații mai scăzute de CO₂. Procesul de captare a CO₂ cu membrană poate fi integrat cu diferite aplicații precum CFPP, gazele naturale și diferite industrii chimice. Procesul de separare a gazelor prin membrană, investigat în prezentul studiu, este considerat a fi o metodă aplicabilă și optimistă pentru reducerea dioxidului de carbon care poate concura cu procesele convenționale de separare a CO₂ în ceea ce privește penalitățile energetice și prețul. Cu toate acestea, materialele polimerice sunt cele mai mature materiale utilizate pentru îndepărtarea CO₂-ului în mecanismul de difuzie în soluție.

Separarea criogenică include un procedeu de captare fizică care captează dioxidul de carbon sub temperaturi extrem de scăzute. Dezavantajele esențiale ale procesului criogenic implică creșterea consumului de energie pentru refrigerare, în special pentru fluxurile de gaze diluate, și blocările cauzate de prezența unor componente precum apa, care trebuie să fie separate înainte de unitățile de răcire.

Capitolul 3 – Optimizarea membranelor pentru captarea de CO₂

Diferite cerințe ar trebui luate în considerare, cum ar fi o rată mare de captare și costuri de operare reduse, pentru a îmbunătăți procesul de recuperare a dioxidului de carbon. Mai mult, flexibilitatea procesului bazat pe membrană sta la baza alegerii celei mai bune configurații pentru procesul de captare a CO₂-ului. Sistemul membranar poate conține de la 1 până la 3 module, configurațiile fiind optimizate cu ajutorul unui model numeric care utilizează algoritmul prezentat în Figura 2 pentru parametri specifici ai membranei.

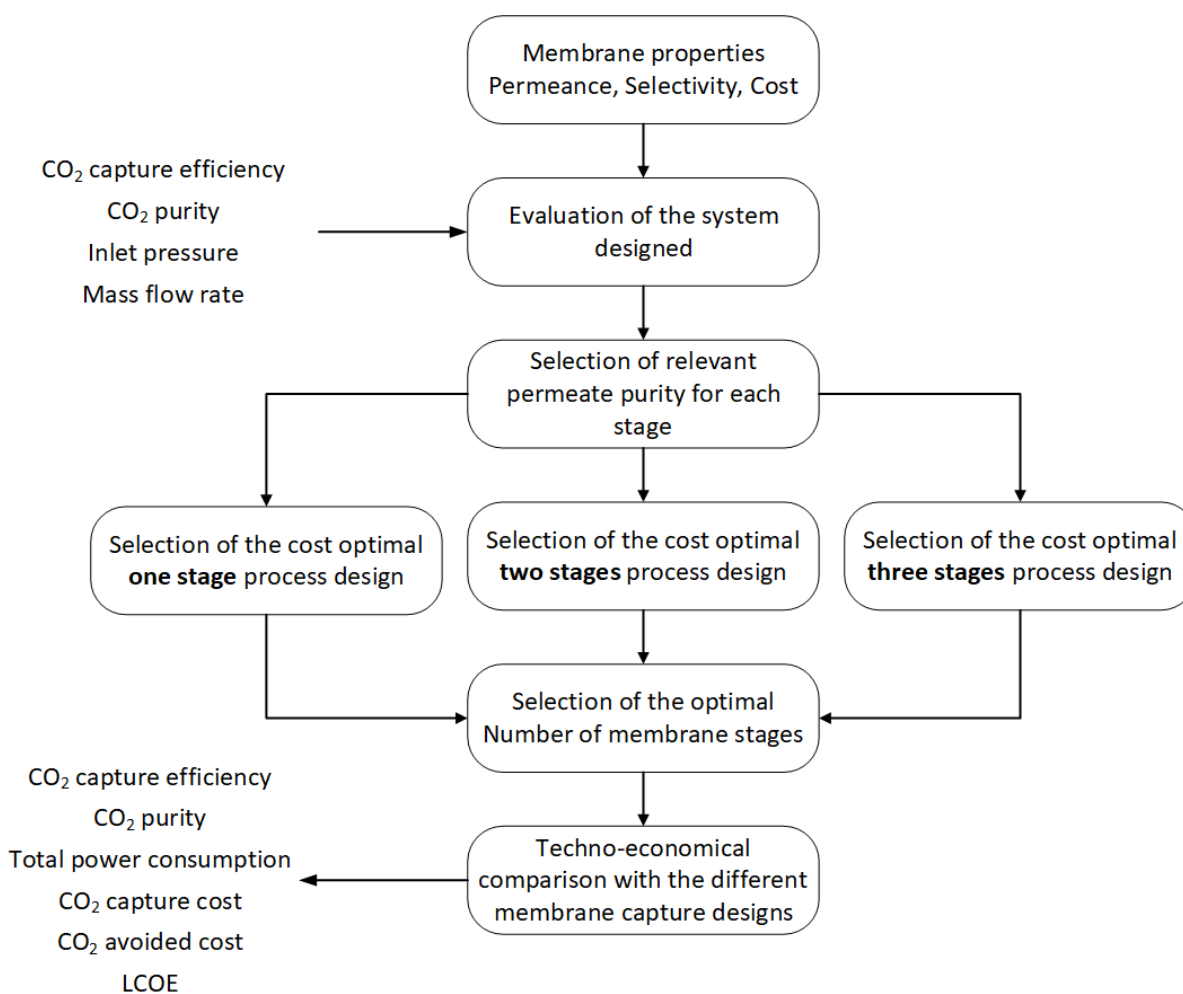


Figura 2. Algoritmul procesului de analiză a sistemelor membranare

În acest studiu, mai multe configurații cu diferiți parametri ai membranelor polimerice sunt utilizate pentru a optimiza tehnologia de captare a CO₂, a se vedea Figura 3. Mai mult, creșterea

presiunii compresorului până la 70 de bar s-a considerat pentru fiecare caz luat în considerare pentru a comprima CO₂-ul captat din fluxul de gaze pentru următorul pas (transport, stocare sau utilizare directă). După unitatea de compresie, se recomandă un schimbător de căldură pentru reducerea temperaturii ca urmare a compresiei de înaltă presiune. Puterea necesară pentru echipamentele auxiliare ale membranei (compresoare, pompe de vid) provine de la centrala electrică studiată. Polimerul de poliacrilamidă a fost integrat cu o enzimă numită CA într-un proiect de cercetare (proiectul CO₂ hibrid) derulat la UNSTP în perioada 2020-2023, acest material fiind selectat pentru cercetarea actuală datorită avantajelor sale specifice, cum ar fi caracteristica sa de permeabilitate și selectivitate ridicate. CHEMCAD 8.1 este platforma de simulare folosită pentru a investiga toate configurațiile propuse precum și integrarea acestora în diferite sisteme energetice. În fiecare configurație propusă, au fost examinate diferite valori ale compresoarelor și pompelor de vid pentru a determina eficiența optimă și puritatea captării CO₂ la un cost mai scăzut. În acest studiu de cercetare se evaluează, de asemenea, impactul diferitelor permeabilități de CO₂ (300; 1000; 3000 GPU) pentru captarea CO₂-ului post-combustie tehnologie integrată în cadrul centralelor termoelectrice cu parametri supercritici.

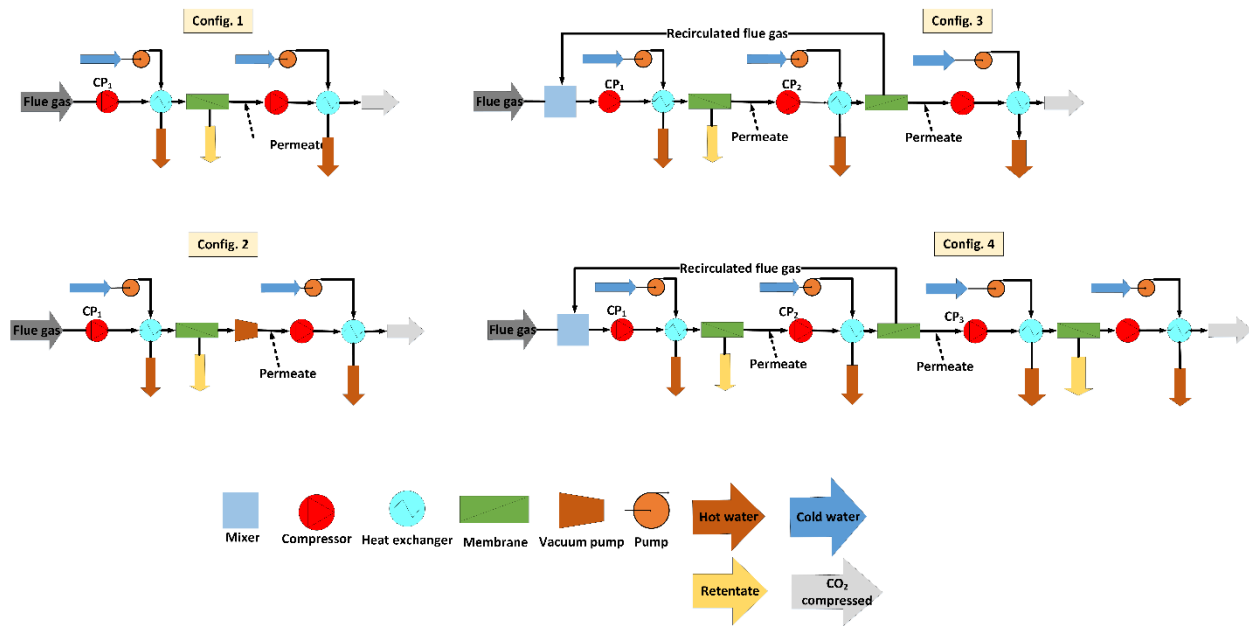


Figura 3. Schema fiecărei configurații propuse

Figura 3 (Configurațiile 1 și 2) reprezintă schema considerată pentru un singură treaptă de membrană, cu și fără utilizarea unei pompe de vid. Amestecul de gaze (care conține CO_2) produs din surse diferite a fost introdus într-o unitate de comprimare pentru a crește forța motrice pentru recuperarea dioxidului de carbon. Apoi, fluxul comprimat trece printr-un schimbător de căldură pentru a reduce temperatura la aproximativ 50°C generată de compresor, ulterior introdus în modulul membranar. O pompă de vid a fost utilizată pentru a crește rata de captare prin creșterea forței motrice pe tot modulul membranar. Utilizarea unităților de comprimare și/sau a pompelor de vid este fundamentală în sistemele de membrană pentru separarea CO_2 -ului și pentru a compensa conținutul scăzut de dioxid de carbon și presiunea scăzută în gazele de ardere. Pentru cele două etape de membrană, din Figura 3 (configurația 3), al doilea modul de membrană a fost utilizat pentru a trata fluxul permeat din primul modul de membrană. În această fază, au fost utilizate două unități de comprimare înainte de fiecare membrană fără utilizarea pompei de vid. Scopul principal al utilizării unei unități de comprimare înaintea celui de-al doilea stadiu de membrană a fost de a îmbunătăți eficiența modulului. Fluxul recirculat a fost considerat din fluxul de retentat al celui de-al doilea

stadiu pentru a îmbunătăți rata procesului de recuperare. Două unități de membrană au fost proiectate pentru a depăși rezultatele scăzute în ceea ce privește puritatea dioxidului de carbon prin introducerea unei suprafețe reduse pentru al doilea modul de membrană. Sunt necesare sisteme de membrane cu mai multe etape și utilizarea fluxului de reciclare pentru a obține o eficiență ridicată în recuperarea dioxidului de carbon cu concentrație ridicată. Figura 3 (configurația 4) prezintă sistemul presupus pentru simularea capturii de CO₂. Motivul principal pentru integrarea unui al treilea stadiu de membrană a fost de a examina impactul său asupra reducerii consumului de energie al procesului la aceeași eficiență și puritate în îndepărtarea CO₂-ului.

Diverse configurații de sisteme de membrane au fost modelate și studiate pentru diferite centrale electrice (centrale electrice pe cărbune și IGCC ce utilizează biomasă) în recuperarea dioxidului de carbon în post- și pre-combustie. Sistemele de membrană utilizate pentru procesul de captare a carbonului au fost dimensionate pentru a atinge o eficiență de separare a CO₂ de 90% cu o puritate de peste 95%. Este necesară o puritate ridicată pentru faza de transport și utilizare, cum ar fi recuperarea petrolului din zăcăminte epuizate (EOR). Validarea rezultatelor obținute ale tehnologiei simulate este demonstrată prin realizarea de analize de sensibilitate pe baza diferiților parametri precum eficiența captării de CO₂, forța motrice a membranei, permeabilitatea/selectivitatea CO₂, compoziția gazelor de ardere, suprafețele membranelor și ponderea gazelor de ardere recirculate. Astfel, s-au evidențiat efectele diferiților parametri asupra performanțelor membranei precum eficiența de captare, puritate dar și asupra indicatorilor economici precum cost, venitul net actualizat, rata internă de rentabilitate, etc.

Concentrația volumică de CO₂, contrastată cu un debit mare de gaze de ardere, reprezintă dificultatea esențială pentru procesul de captare post-combustie, ceea ce conduce la o forță motrice scăzută a dioxidului de carbon recuperat. Pentru a depăși forța motrice redusă în procesul de membrană integrat în tehnologia de captare a CO₂ post-combustie, se impune integrarea fie a unui

compresor înaintea modului de membrană, fie a unei pompe de vid în partea de flux capturat, fie ambele împreună. În figura 4 se prezintă tehnologia prin membrană utilizată în procese post-combustie.

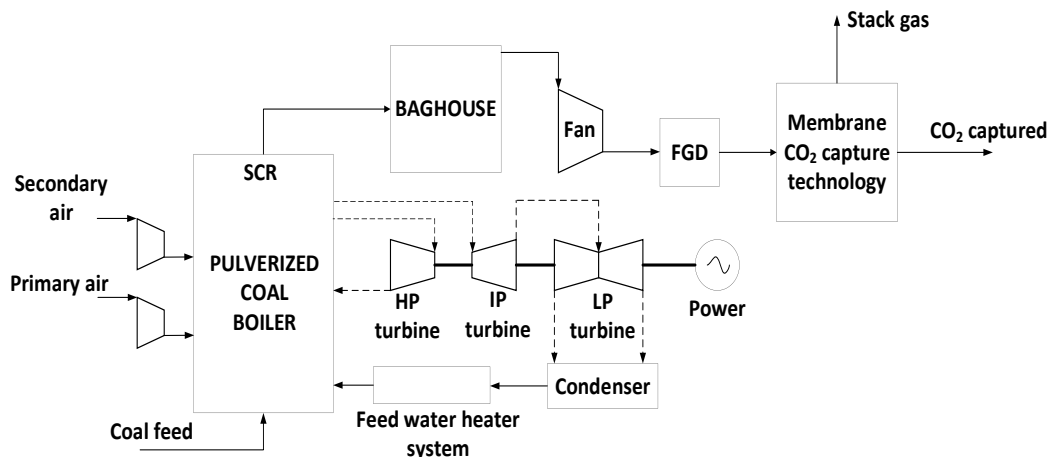


Figura 4. Integrarea membranei într-o centrală termoelectrică.

Caracteristica fundamentală a utilizării biomasei constă în faptul că biomasa absoarbe CO_2 în timpul creșterii sale, ceea ce este egal cu cantitatea eliminată în etapa de ardere. Cea mai eficientă cale de utilizare a biomasei este prin gazeificare. Cuplarea unei metode de gazeificare a biomasei cu o centrală electrică cu ciclu combinat reprezintă o alegere promițătoare pentru producția de energie fără generarea de emisii de CO_2 . Pierderile de energie necesare procesului de captare a CO_2 sunt compensate prin captarea suplimentară a dioxidului de carbon, creând astfel o centrală electrică cu emisii negative de CO_2 . Cu toate acestea, metoda de gazeificare folosind biomasa drept combustibil și ciclul combinat dotat cu eliminarea dioxidului de carbon reprezintă o tehnologie potențial promițătoare pentru a îndeplini obiectivul de reducere a carbonului pentru a face față amenințărilor schimbărilor climatice. În cazul combustibililor solizi (ca și biomasa), metoda de recuperare pre-combustie este preferabilă datorită atât concentrației volumice ridicate de dioxid de carbon din gazul de sinteză (mai mult de 20%), cât și presiunii gazului (20–50 bar). Aceste valori ar putea fi obținute utilizând drept agent de gazeificare O_2 în loc de aer, ceea ce conduce la obținerea de valori mai

ridicate decât în varianta de captare post-combustie. Un sistem clasic de îndepărtare a CO₂-ului înainte de ardere necesită o secțiune de gazeificare, așa cum este arătat în Figura 5. În ceea ce privește procesul de gazeificare, combustibilul solid este gazeificat pentru a produce un gaz de sinteză îmbogățit cu monoxid de carbon și hidrogen. După eliminarea particulelor prin intermediul unei secțiuni de separare cu ciclon, gazul de sinteză este trimis la secțiunea de transformare a gazului cu apă (WGS), unde monoxidul de carbon interacționează cu aburul pentru a produce un amestec de CO₂ și H₂. Apoi, amestecul este procesat în metode de desulfurare și separare a dioxidului de carbon (de exemplu, membrană), generând un combustibil plin de H₂ care poate fi utilizat în mai multe moduri, de exemplu în turbine cu gaz sau motoare cu ardere internă.

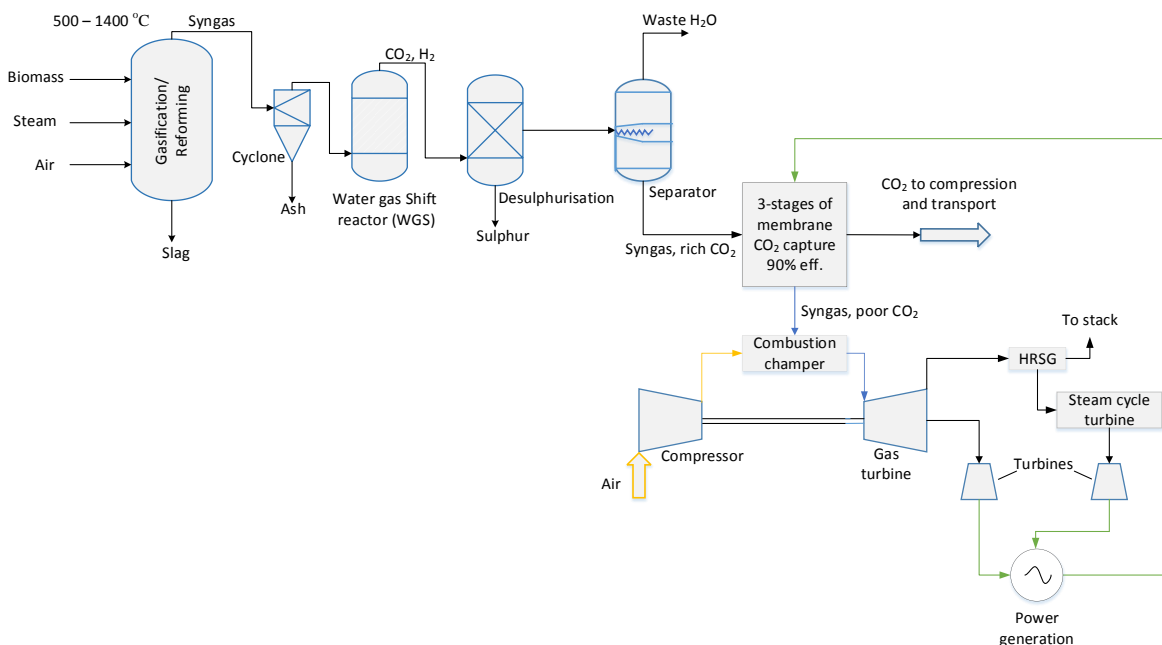


Figura 5. BIGCC cu captare CO₂ pre-combustie.

Pentru a înlătura dezavantajele fiecărui sistem, sistemul hibrid de recuperare a CO₂ (membrană și absorbție chimică) a fost studiat în prezenta teză de doctorat. Sistemele hibride folosesc proprietățile procesului de membrană pentru a recupera dioxidul de carbon, în timp ce metoda de absorbție chimică este utilizată pentru a îndeplini specificațiile dorite (în principal puritate CO₂). Deoarece procesul de recuperare a dioxidului de carbon nu este complet dezvoltat în industrie

din punct de vedere comercial, studiul evaluării techno-economice permite stabilirea direcțiilor în care ar trebui să se îndrepte cercetarea astfel încât mediul industrial și energetic să accepte utilizarea tehnologiilor de captare CO₂. Cu toate acestea, evaluarea tehnologiilor hibride de recuperare CO₂ și impactul lor economic este complicat de realizat din cauza mai multor factori precum complexitatea proceselor care trebuie evaluate în mod concomitent. Atunci când regenerarea solventului este combinată cu tehnologia prin membrană, sistemele de îndepărtare a dioxidului de carbon sunt afectate de diferiți factori, cum ar fi variația debitului de gaze de ardere, fracția de CO₂, dar și eficiența și puritatea impusă. Cu toate că sistemul hibrid membrană-solvent pentru recuperarea dioxidului de carbon a fost cercetat, un studiu detaliat al procesului combinat cu emisiile de dioxid de carbon într-un stil organizat și cuprinzător nu a fost realizat. Majoritatea investigațiilor s-au concentrat în prezent pe avantajele metodei hibride, cum ar fi reducerea cerințelor energetice. Cu toate acestea, o evaluare economică completă nu a fost investigată, prin urmare, concepția actuală a sistemelor hibride este limitată. Scopul sistemului hibrid este de a analiza îndepărtarea pre-combustie a CO₂ din fluxul de sinteză emis de BIGCC (Cicluri Combinate cu Gazeificare Integrată), dotate cu sisteme precum membrana, regenerarea solventului sau sisteme hibride rezultate din combinarea acestora. Două scheme de membrană spiralată și absorbție chimică au fost investigate pentru captarea CO₂ cu o puritate ridicată. Ulterior, a fost investigat un sistem hibrid membrană-solvent pentru optimizarea configurației. Scopul cercetării este de a evalua performanța ansamblului membrană și absorbție chimică cu procesul de gazeificare care folosește aer sau oxigen ca agent oxidant, a se vedea Figura 6, pentru obținerea unei eficiențe de 90% (valoare acceptată în literatura de specialitate) a emisiilor de CO₂, cu o puritate de 99%, această puritate fiind recomandată pentru diferite utilizări industriale.

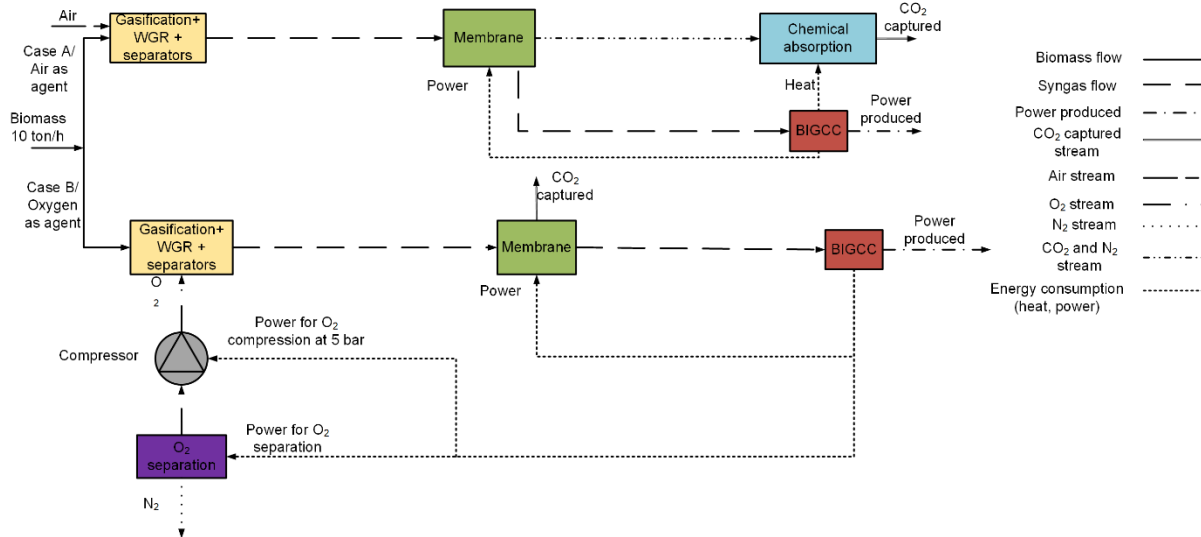


Figura 6. Configurații hibride pentru captare de CO₂ într-o BIGCC.

Gazul de sinteză obținut după procesul de membrană (fluxul de reținut) a fost introdus direct în ciclul combinat pentru generarea de electricitate. Aburul turbinei de presiune (5 bar) a fost utilizat fie pentru a furniza energie termică pentru regenerarea solventului (cazul A), fie pentru a acoperi cerințele WGR (reactorul de transformare a gazului cu apă) pentru cazul B. În cazul A, aburul necesar pentru WGR a fost generat din HRSG (generator de abur cu recuperare de căldură), unde au fost utilizate 500 kg/h de gaz natural.

Capitol 4 – Analiza tehnico-economică

În acest studiu, s-a investigat, de asemenea, conexiunea dintre prețul de captare a CO₂ și cantitatea de CO₂ din fluxul de alimentare cu gaz. Pentru fiecare caz, consumul de energie cerut pentru procesul cu membrană, cheltuielile operaționale (OPEX) și cheltuielile de capital (CAPEX) au fost calculate și comparate. Mai mult, bazându-ne pe CAPEX și OPEX și luând în considerare o durată de utilizare de 25 de ani, s-a determinat costul actualizat al electricității (LCOE). Pentru fiecare caz, au fost determinate costurile evitate și de captare a CO₂. Indicatorii economici analizați au fost cash flow-ul actualizat (NPV), indicele de profitabilitate, și perioada de recuperare a

investiției (DPP), pe baza fluxurilor de numerar intrate, cu ajutorul cărora s-au comparat variantele analizate permițând alegerea celei mai bune variante.

Capitolul 5 – Rezultate și discuții

5.1 Integrarea membranelor în centralele termoelectrice

Rezultatele au arătat că integrarea unei singure etape de membrană poate fi considerată suficientă pentru proiectele cu cerințe reduse de puritate a CO₂-ului. Presiunea compresorului este componenta principală care influențează rata de captare a dioxidului de carbon, puterea necesară și puritatea CO₂-ului eliminat. Puritatea dioxidului de carbon este, de asemenea, afectată de creșterea presiunii primului compresor cu aproximativ 17% la aceeași suprafață a primei membrane. Rezultatele au arătat că creșterea forței motrice pe sistemul membranelor conduce la o reducere constantă a suprafeței membranei, reducând astfel cheltuielile de capital și de operare-mentanță. Suprafața primei membrane are un impact direct major asupra ratei totale de recuperare, de exemplu, creșterea suprafeței primei membrane de la 200.000 la 600.000 m² a permis o creștere a eficienței de captare a CO₂-ului cu aproximativ 31% la aceeași presiune a compresorului, a se vedea figura 7.

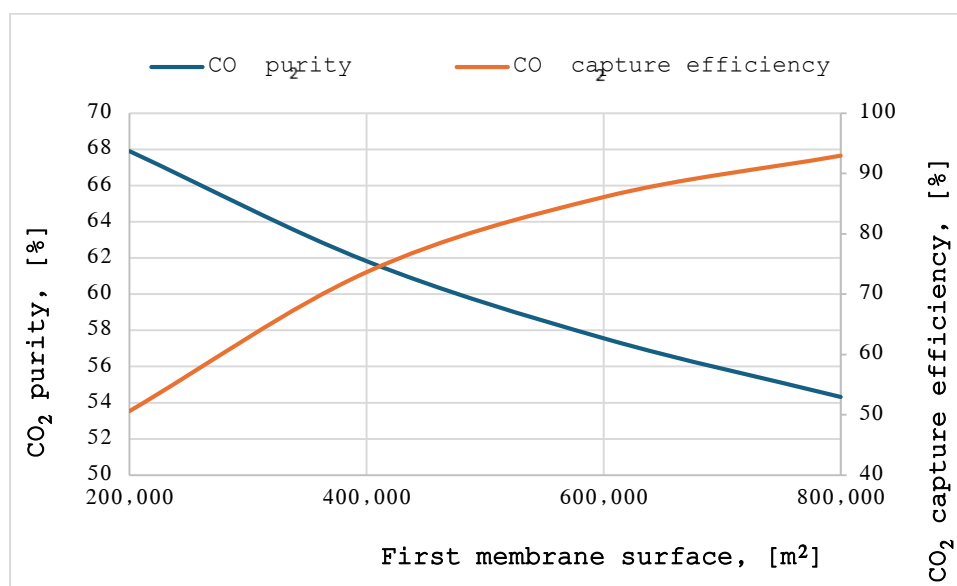


Figura 7. Variația eficienței de captare CO₂ și a purității într-o centrală termoelectrică de 600 MW.

Mai mult, simulările au arătat că adăugarea mai multor trepte membranare conferă avantajul creșterii purității CO₂-ului recuperat datorită tratării unui flux din ce în ce mai mic. Proiectarea procesului în configurație cu două etape este un proces eficient pentru proiectele cu cerințe de puritate de 95% la o permeabilitate a dioxidului de carbon variind între 1000 - 3000 GPU. Presiunea mare a compresorului crește puterea necesară pentru procesul cu membrană, ceea ce scade eficiența centralei electrice.

Figura 8 prezintă eficiența centralei electrice după utilizarea tehnologiei de captare a CO₂ cu membrană. Parametrii sistemului de membrană au fost utilizați pe baza cazului optim obținut din configurația cu 2 etape. Eficiența netă a centralei electrice este redusă cu aproximativ 21,82%, iar această procentaj este împărțit în 17,46% pentru energia necesară compresoarelor și pompelor de vid pentru captarea CO₂-ului și 4,36% pentru unitățile de comprimare a CO₂-ului capturat pentru pregătirea gazului pentru stocare și transport.

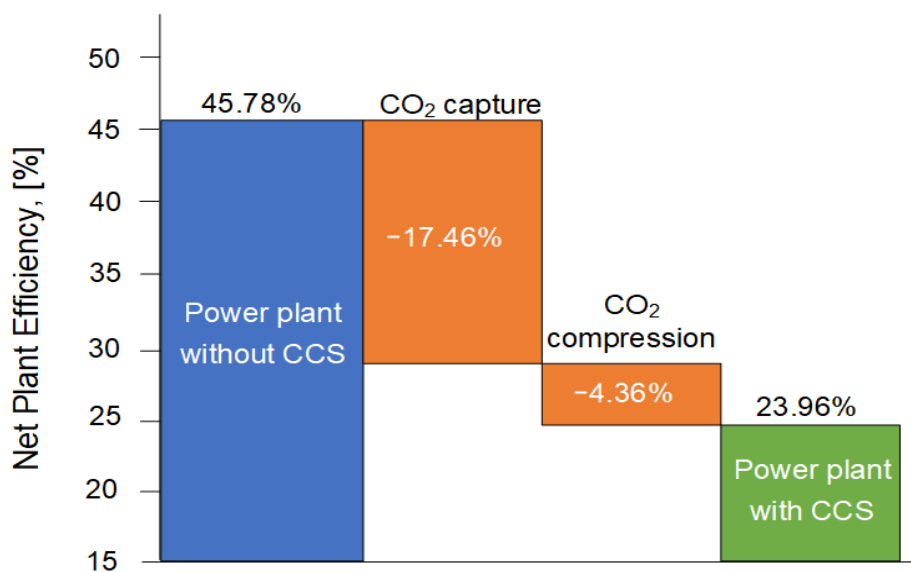


Figura 8. Variația eficienței centralei electrice de 330 MW dotată cu sistem de membrane pentru captarea de CO₂

Pentru a estima efectele recirculării gazului de evacuare din a doua membrană asupra eficienței de captare a CO₂-ului, trei cazuri de recirculare a fluxului de gaz de evacuare au fost examinate în Figura 9 după cum urmează:

Cazul 1. Recircularea retentatului din a doua membrană

Cazul 2. Recircularea retentatului din prima membrană

Cazul 3. Fără recirculare

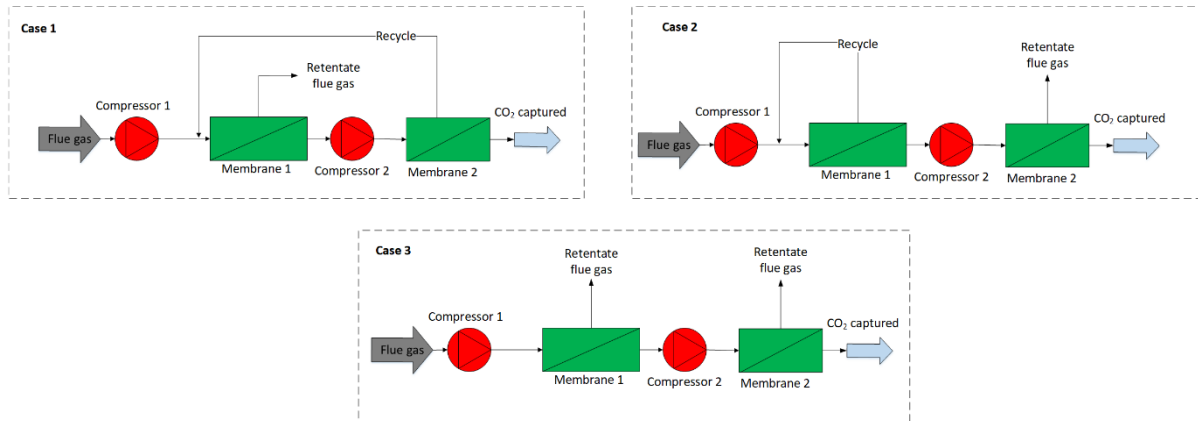


Figura 9. Efectele recirculării asupra performanțelor sistemului membranar

Tabelul 1. Evaluarea centralei de 330 MW pentru cele 3 cazuri

Cazuri	Unități	Cazul 1	Cazul 2	Cazul 3
Eficiența captării de CO ₂	%	94.85	37.91	43.94
Puritate CO ₂	%	96.85	90.33	87.01
Putere	MW	189	47,369	134

După cum se arată în Tabelul 1, cazul 1, în care fluxul recirculat este situat pe partea de retentat a celei de-a doua membrane, este ideal datorită eficienței ridicate de recuperare a dioxidului de carbon și a purității sale. În cazul 2, eficiența de recuperare a dioxidului de carbon este extrem de scăzută din cauza unei suprafețe de membrană mici (SA2 de 40.000 m²). Ca urmare a fluxului recirculat ridicat de la prima unitate de membrană către partea principală a fluxului, energia CP1 este mult mai mare, ceea ce crește consumul de energie solicitat (47.369 MW). Cazul 3 arată o eficiență de captare a CO₂-ului excesiv de scăzută (43,9%) din cauza fluxului de retentat de pe ambele părți.

Cu toate acestea, s-a observat că realizarea în două etape nu este economic convenabilă pentru un sistem cu puritate de 99% CO₂, ca urmare a unui consum de energie mai ridicat. Urmare a

procesului de modelare, integrarea a trei unități de membrane a ajutat întregul proces să obțină rate de eficiență și puritate de 90 și 99%, și cu aproximativ 12% mai puțină energie consumată decât utilizarea a două etape la aceleași caracteristici ale gazelor de ardere. Recircularea fluxului de gaze rezultat din a doua membrană a redus emisia de CO₂ în atmosferă, iar această structură a îmbunătățit procesul cu o rată ridicată de eliminare a dioxidului de carbon și puritate. Recircularea fluxului de gaze proiectat din a doua unitate de membrană a crescut eficiența captării CO₂ cu aproximativ 54%. Rezultatele obținute au arătat că o permeabilitate mai mare a CO₂ demonstrează o rată mai mare de captare a CO₂ și puritate mai mare, precum și o suprafață mai mică a membranei. Cu toate că o puritate mai mare a CO₂ poate fi obținută pentru materiale cu o permeabilitate mare a CO₂, consumul de energie este mai mare și poate să nu fie favorabil din punct de vedere economic. Tabelul 2 prezintă principalele rezultate a configurațiilor membranare propuse

Tabelul 2. Rezultatele principale ale configurațiilor analizate

Configurații	Unități	Config. 1	Config. 2	Config. 3	Config. 4
Eficiența CO ₂	%	90.1	90.3	90.0	90.7
Putere	MW	289.1	238.5	340.6	298.3
Puritate CO ₂	%	45.6	73.3	99.1	99.7
LCOE	EUR/MWh	137	109	157	134
Cost captare CO ₂	EUR/t	47.16	35.44	62.47	51.82
Cost evitat CO ₂	EUR/t	51.3	52.16	134.4	93.82

Indiferent de permeabilitatea CO₂ a membranei, procesul de comprimare într-un sistem cu membrană prezintă aportul cel mai mare la costul final al energiei produse (LCOE) ca urmare a forței motrice relativ scăzute prin membrană. Îmbunătățirea presiunii parțiale a CO₂ la intrare în sistemul membranar este o tehnică eficientă fundamentală pentru reducerea LCOE-ului. Suprafața mare crește costurile de capital (CAPEX-ul), iar presiunea mare a compresorului influențează costurile operaționale (OPEX-ul) ca urmare a fluxului de permeat mai mare de trece prin membrană, ceea ce crește consumul de energie necesar. Prin creșterea suprafeței membranei, eficiența centralei electrice

scade constant ca urmare a consumului mai mare de energie necesar trecerii fluxului de gaz prin membrană. Astfel, creșterea consumului de energie a condus la o creștere a perioadei de recuperare a investiției (DPP).

Figura 10 de mai jos prezintă fluxul de numerar cumulat al diferitelor sisteme de membrane integrate în centrala electrică pe cărbune pe toată durata de viață a acesteia (25 de ani). După aproape 8 ani, costul investiției va fi recuperat în cazul unei singure etape. Integrarea a 3 etape a redus perioada de recuperare a investiției cu aproximativ 13% în comparație cu utilizarea a 2 etape cu membrană.

Figura 11 de mai jos prezintă influența CAPEX, a combustibilului și a altor indicatori diverși asupra LCOE la CFPP în cazul integrării celui de-al treilea caz cu membrană. Impactul factorilor CAPEX și a capacității centralei asupra LCOE a condus la creșterea de la 124 la 143 EUR/MWh prin modificarea prețului CAPEX cu +/-10%.

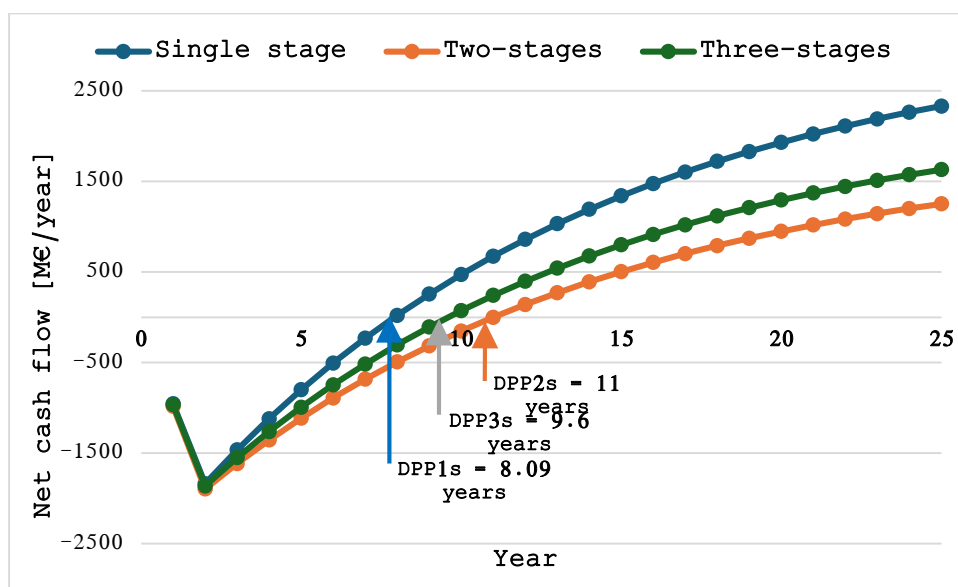


Figura 10. Termenul de recuperare pentru diferite cazuri analizate considerând centrala de 600 MW.

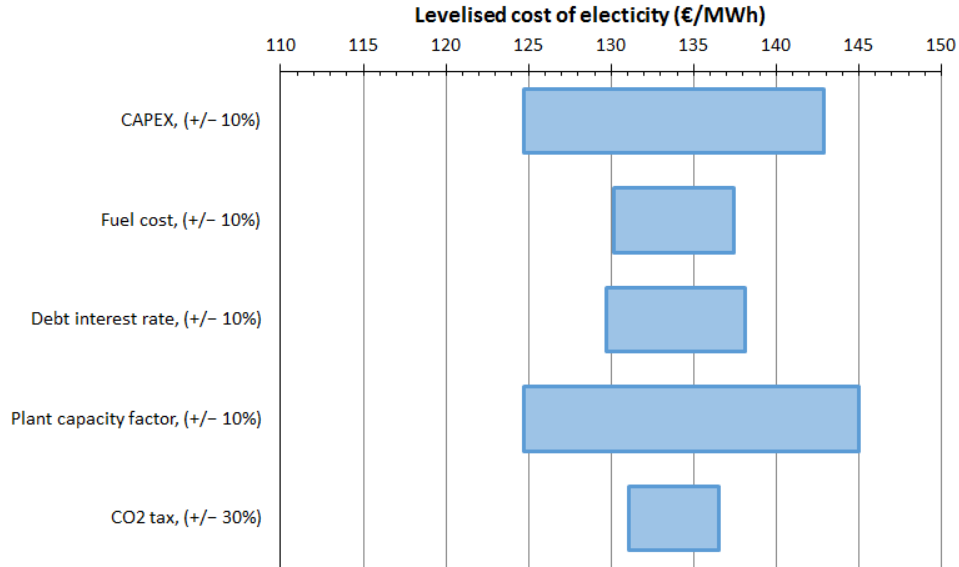


Figura 11. Analiza de sensibilitate pentru centrala de 600 MW

5.2 Integrearea sistemului membranelor în BIGCC

Tabelul 3 prezintă o diferențiere de evaluare între centrala electrică BIGCC fără utilizarea procesului de pre-combustie cu membrană.

Tabelul 3. Analiza tehnico-economică a centralei BIGCC (50 MW) cu și fără membrană.

Parameter	Unit	BIGCC Single	BIGCC with Membrane
Introduced biomass	t/h	31.86	31.86
Global efficiency (LHV syngas)	%	62.20	37.60
Global efficiency (LHV biomass)	%	29.80	18.04
Net power produced	kW	50,000	30,245
CO ₂ recovery factor	kg/MWh	0.00	-822.63
CO ₂ recovered	kg/MWh	n.a.	939.11
Electricity needed for membrane process	kWe	n.a.	19,700
Membrane power consumption	kWh/tCO ₂	n.a.	694
LCOE_rate	EUR/kWh	0.0974	0.1410
SEPCCA	MJel/kg	n.a.	2.86
CO ₂ avoided price	EUR/t	n.a.	52.94
CO ₂ captured price	EUR/t	n.a.	46.37

În momentul în care sistemul cu membrană a fost integrat cu centrala electrică BIGCC, energia netă generată a fost redusă cu aproximativ 60% din cauza energiei suplimentare solicitate de componentele auxiliare utilizate în membrană (cum ar fi compresoarele). După cum s-a menționat deja, biomasa este un combustibil neutru care absoarbe CO₂ în timpul creșterii sale pentru fotosinteză, ceea ce demonstrează de ce factorul de recuperare a dioxidului de carbon este mai mic după utilizarea tehnologiei de captare. Procesul cu membrană integrată a provocat o creștere semnificativă a LCOE de 69%, care poate fi explicată prin mai multe elemente utilizate pentru a elimina dioxidul de carbon din fluxul de gaz de sinteză.

5.3 Sistem hybrid: Membrană polimerică – Absorbție chimică pentru captarea pre-combustie a CO₂

În ceea ce privește concentrația volumică, dioxidul de carbon din gazul de sinteză reprezintă 23,9% din fluxul de gaz de sinteză, iar CO₂ este generat ca urmare a reacției dintre CO din gazul de sinteză și aburul injectat în reactorul WGS. Astfel, debitul de CO₂ este de 319,8 kg/h (așa cum se arată în figura 12). Fără procesul de captare CO₂, emisia de CO₂ este de 6336,4 kg/h, ceea ce reprezintă cantitatea de CO₂ absorbită în timpul creșterii biomasei (procesul de fotosinteză).

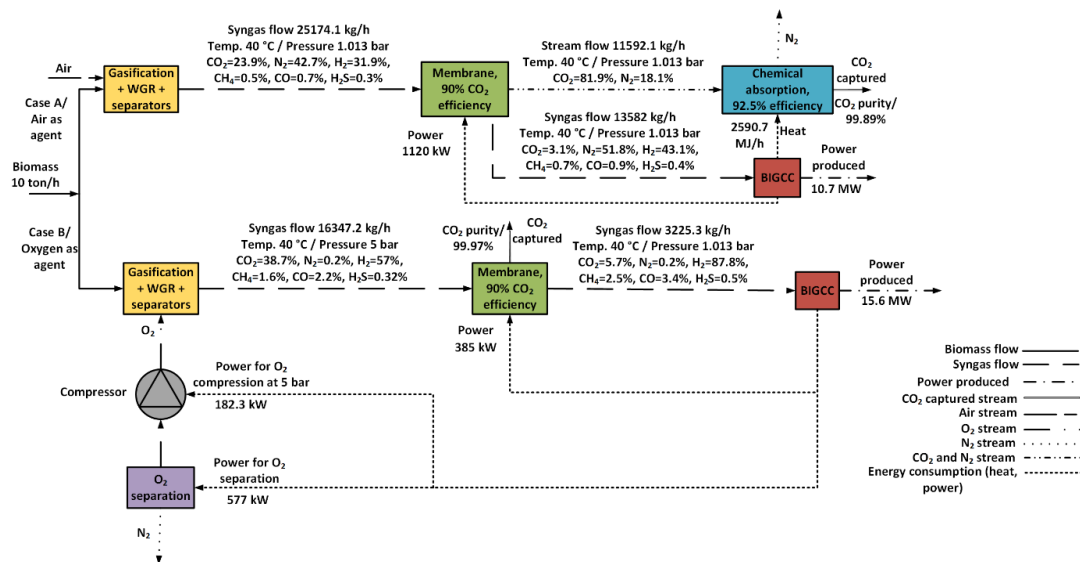


Figura 12. Bilanțul masic pentru centrala BIGCC

Nu au fost luate în considerare emisiile de CO₂ generate de energia primară pentru prepararea biomasei și transportul la centrala electrică. Tabelul 4 prezintă rezultatele optime ale fiecărui caz simulat și modelat.

Tabelul 4. Evaluarea sistemelor cu și fără captare CO₂ utilizând aer (Cazul A) și oxigen (Cazul B)

Cases	Case A		Case B	
	No CO ₂ capture	With CO ₂ capture	No CO ₂ capture	With CO ₂ capture
Biomass flow, ton/h	10	10	10	10
Heat flow with syngas, kW	24,979	24,979	8698	8698
CO ₂ emissions for biomass growth, kg/h	6336.4	6336.4	7534.5	7534.5
CO ₂ emissions from natural gas usage, kg/h	No use	1380.3	No use	No use
Total CO ₂ emissions, kg/h	6336.4	2013.9	7534.5	753.45
Membrane surface area, m ²	-	25,000	-	2500
Compressor pressure, bar	-	2.2	-	No use
Vacuum pump pressure, bar	-	0.25	-	0.25
L/G ratio for Chemical absorption, mole/mole	-	12.4	-	No use
Solvent flow, kmol/h	-	350	-	No use
Energy consumption for chemical absorption, MJ/kg	-	3.9	-	No use
Power of gas turbine, kW	8968.2	8968.2	12,234.4	12,234.4
Power of steam turbine, kW	2896.2	2896.2	4559.1	4559.1
Global efficiency, %	42.0	38.0	42.3	41.3
CO ₂ factor, kg/MWh	-	-435.5	-	-877.4
NPV, million EUR	9152	67,411	32,470	124,830
DPP, years	17.73	8.17	8.07	4.5
Profitability index	1.18	2.15	1.62	3.87
LCOE, EUR/MWh	157	142.5	135.3	86.1

Factorul CO₂ calculat în cazul A este mai mare decât în celelalte cazuri din cauza CO₂ suplimentar produs de arderea gazelor naturale. Eficiența globală în cazul A a fost redusă de utilizarea procesului CCS, în care s-a consumat atât energie electrică cât și termică pentru procesul de regenerare a membranei și a solvenților. Pe de altă parte, eficiența globală în cazul B nu a fost influențată în mare măsură de utilizarea CCS din cauza energiei scăzute necesare pentru membrana VP (385 kW).

În cazul A, procesul de gazeificare a avut loc la presiune atmosferică, astfel încât nu a fost nevoie de energie electrică pentru a comprima debitul de aer necesar. Gazul de sinteză produs are un debit ridicat, prin urmare, s-a utilizat un compresor înainte de etapa de membrană pentru a crește eficiența eliminării CO₂, ceea ce a dus la creșterea necesarului de energie electrică. Chiar dacă PAC a contribuit la creșterea purității de recuperare a CO₂, a crescut indicatorul CAPEX și a redus producția totală de energie electrică în ciclul combinat din cauza energiei termice necesare. Pe de altă parte, utilizarea O₂ ca agent de oxidare are avantajul de a nu utiliza CAP în proces datorită purității ridicate (99,9%) obținute după etapa de membrană, ceea ce a condus la reducerea costurilor CAPEX în cazul B. Spre deosebire de cazul A, a fost necesară energie electrică pentru separarea O₂ din aer, care poate fi considerată un consum de energie din ciclul combinat.

Cu toate acestea, integrarea unui compresor de 5 bar în fluxul de O₂ (în procesul de gazeificare) a generat gaz de sinteză la presiune ridicată, fără a fi nevoie să se furnizeze energie electrică pentru etapa cu membrană, ca în cazul utilizării aerului. În consecință, energia electrică produsă în cazul B este mai mare decât cea produsă în cazul A.

5.4 Soluții pentru îmbunătățirea sistemelor de captare CO₂

Utilizarea unui sistem de recuperare a energiei (expander) fluxului bogat în N₂ a îmbunătățit sistemul complet de captare în ceea ce privește evaluarea economică. Costul evitat al CO₂ a scăzut cu 34% după integrarea expanderului în aceeași configurație de proces datorită energiei recuperate, ceea ce a dus la scăderea consumului de energie pentru metoda de captare, see Figure 13. Cu toate acestea, integrarea expanderului în sistemul de captare a CO₂ cu membrane a ilustrat un proiect mai profitabil cu aproximativ 11% în comparație cu același proiect fără unitatea de expander.

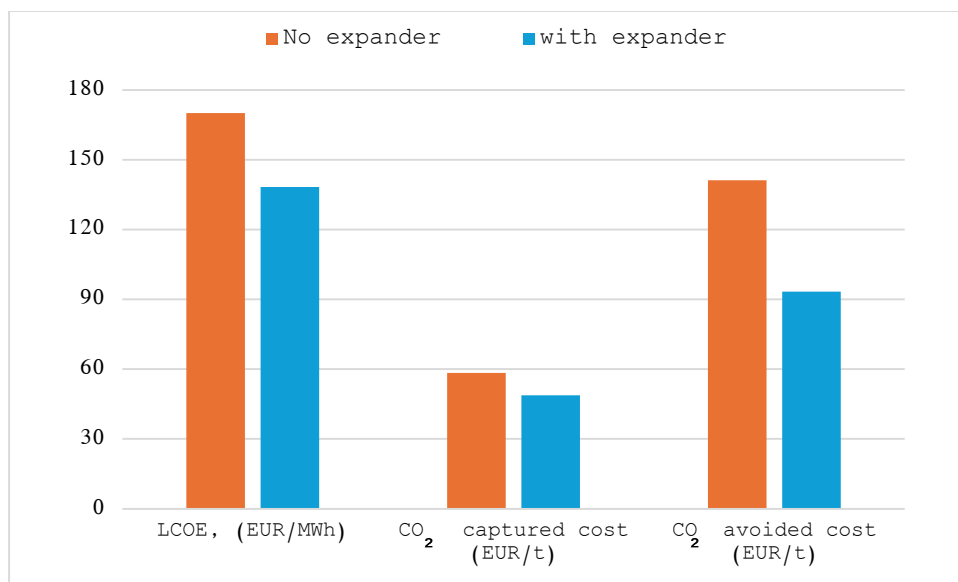


Figura 13. Influența expanderului asupra indicatorilor economici.

5.4 Validarea rezultatelor obținute în procesele pre- și post-combustie

Validarea rezultatelor pentru sistemele de post-combustie și pre-combustie a fost realizată prin compararea rezultatelor cercetării actuale cu rezultatele obținute în literatura de specialitate pentru a observa eventualele diferențe cu privire la modelul dezvoltat în cadrul tezei. Tabelul 5 de mai jos prezintă o comparație detaliată între rezultatele cercetărilor recente bazate pe membrană și alte articole deja publicate cu privire la diferite tehnologii de captare a CO₂ (CAP, absorbție fizică) în procesul de post/precombustie pentru diferiți parametri substanțiali.

Tabelul 5. Validarea rezultatelor obținute în sistemele pre- și post-combustie

Parameters	Post-combustion			Pre-combustion		
	Current results	CAP (1)	CAP (2)	Current results	CAP (3)	Physical absorption
CO ₂ capture efficiency, (%)	90	85	90	90	90	95
CO ₂ purity, (%)	96.8	99.5	95	99	95	99
Efficiency loss, (%)	37.3	n.a.	n.a.	39.4	n.a.	n.a.
LCOE, (EUR/MWh)	138	130	75	141	148	142

CO ₂ avoided cost, (EUR/t)	93.28	86.4	37.1	52.94	60.4	67.22
CO ₂ captured cost, (EUR/t)	48.77	n.a.	31.4	46.37	n.a.	58.4

În procesul de post-combustie, tehnologia de îndepărtare a dioxidului de carbon prin membrană necesită mai multe îmbunătățiri pentru a concura cu CAP (procesul de absorbție chimică), unde principalii parametri tehnico-economici arată progrese în tehnologia de regenerare a solventului. Rezultatele recente bazate pe tehnologia de membrană în procesul de pre-combustie demonstrează parametri tehnico-economici mai eficienți decât alte tehnologii de captare a CO₂ (de exemplu CAP, absorbție fizică).

Capitolul 6 - Concluzii

1. Integrarea unei singure etape de membrană poate fi considerată suficientă pentru proiecte cu cerințe scăzute de puritate a CO₂-ului. Cu toate acestea, s-a descoperit că sistemul cu o singură etapă de membrană trebuie să fie integrat ulterior cu încă o unitate de membrană sau cu un alt sistem de separare pentru a îmbunătăți concentrația de captare a dioxidului de carbon.
2. Configurația optimă din punct de vedere economic în această analiză este cu membrane în două etape cu compresoare, proiectul este aproximativ cu 40% mai profitabil.
3. Rezultatele au arătat că creșterea diferenței de presiune peste modulul de membrană duce la o reducere constantă a suprafeței de membrană, deci la scăderea costului de capital.
4. Pentru o puritate a CO₂-ului de 99%, proiectarea procesului de membrană cu trei etape în loc de două poate economisi aproximativ 15% din costul LCOE și 17% din cel de captare a CO₂-ului.

5. Utilizarea unui sistem de membrană de captare a CO₂-ului cu material cu permeabilitate ridicată la CO₂ (3000 în loc de 1000 GPU) la o scară mare de putere îmbunătățește eficiența de captare cu aproximativ 53%.
6. Integrarea unui expander în fluxul de retentat a redus costul LCOE și al captării CO₂-ului cu 18% și 20%, respectiv.
7. Nu este convenabil să avem un proces hibrid (membrană și absorbție chimică) pentru sistemul de captare a CO₂ deoarece modulul de membrană are un cost prohibitiv (în prezent), iar hibridizarea se definește printr-un cost mai mare al investiției, fie că procesul cu membrană este integrat înainte sau după absorbția chimică. Dacă absorbția chimică este plasată înainte de tehnologia de membrană, costul investiției ar crește în comparație cu utilizarea doar a absorbției chimice. Dacă absorbția chimică este integrată după membrană, fluxul ce urmează a fi tratat prin procesul de absorbție chimică este mai concentrat în CO₂ ceea ce constituie un avantaj. Pe de altă parte, debitul de solvent chimic crește ca urmare a concentrației de CO₂ mai ridicată dar ca efect pozitiv scade înălțimea coloanei de absorbție și în consecință scad costurile de capital.