



AKREDITASI BAN-PT
UNGGUL

Be Proud & Confident



ORASI ILMIAH

WISUDA AKADEMIK KE-85 DAN PERINGATAN DIES NATALIS KE-45 UNIVERSITAS BUNG HATTA

"Pengaruh Pemisahan CO dan O₂ untuk Meningkatkan Konversi CO₂
Menggunakan Plasma: Studi Kasus Berdasarkan Ansys Chemkin"

Ulung Muhammad Sutopo, S.T., M.Eng., Ph.D.

25 April 2026
Bung Hatta Convention Hall
Kampus Proklamator I



Pengaruh Pemisahan CO dan O₂ untuk Meningkatkan Konversi CO₂ Menggunakan Plasma: Studi Kasus Berdasarkan Ansys Chemkin

Ulung Muhammad Sutopo

Prodi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Bung Hatta, Padang,
25143, Indonesia

ulungmuhammadstp@bunghatta.ac.id

1. Pendahuluan

Pembakaran bahan bakar fosil melepaskan emisi karbon dioksida (CO₂) dalam jumlah besar ke atmosfer. Emisi yang dihasilkan ini harus segera dikurangi karena dampaknya terhadap pemanasan global dan efek rumah kaca. Pengurangan emisi karbon dioksida (CO₂) merupakan kebutuhan mendesak saat ini karena gas ini adalah salah satu penyebab utama perubahan iklim global. Gas CO₂ adalah molekul yang sangat stabil ($\Delta G^\circ = -394$ kJ/mol dan $\Delta H^\circ = +280$ kJ/mol) (1) dan sulit diurai karena membutuhkan energi yang sangat besar sehingga sulit untuk mendapatkan hasil konversi yang tinggi dengan proses yang sederhana. Untuk mengatasi masalah ini, teknologi plasma muncul sebagai solusi yang menjanjikan. Melalui tumbukan elektron, plasma mampu memecah molekul CO₂ pada suhu kamar dan tekanan normal. Selain itu, sistem plasma sangat fleksibel karena mudah dinyalakan atau dimatikan, sehingga sangat cocok dipadukan dengan sumber energi terbarukan yang ketersediaannya sering berubah-ubah.

Pengembangan teknologi daur ulang karbon sedang diprioritaskan untuk mengubah CO₂ menjadi produk bernilai seperti karbon monoksida (CO) dan oksigen (O₂). Beberapa teknologi alternatif sedang dikembangkan, salah satunya adalah teknologi plasma. Plasma adalah gas terionisasi yang terdiri dari molekul, radikal, spesies tereksitasi, ion, dan elektron. Namun, tantangan utama dalam proses ini adalah terjadinya reaksi rekombinasi (reaksi balik) di mana produk dekomposisi bergabung kembali menjadi CO₂, sehingga menurunkan efisiensi konversi secara keseluruhan. Para peneliti sudah menguji bermacam-macam model reactor plasma untuk mengubah gas CO₂ seperti Dielectric Barrier Discharges (DBD) (2-4) dengan desain sederhana, tekanan atmosfer, konversi tinggi (hingga 30%), namun efisiensi energi terbatas (5-10%). Plasma Gelombang Mikro (*Microwave*) diperoleh efisiensi energi sangat tinggi (50-90%), namun biasanya pada tekanan rendah (5). *Gliding Arc* dengan kondisi operasi pada tekanan atmosfer dengan efisiensi energi yang baik (~30%), namun konversi terbatas (8-9%) (6). *Atmospheric Pressure Glow Discharges* (APGD) diperoleh konversi mencapai 12,5% dan efisiensi energi 26% (7,8). Selain konfigurasi plasma terhadap performa dekomposisi CO₂, Rani et al juga melakukan penelitian yang berfokus pada penghilangan dan penambahan gas O₂ dalam meningkatkan konversi CO₂ menggunakan reactor plasma dan didapatkan hasil bahwa penghilangan O₂ dapat meningkatkan konversi dibandingkan dengan penambahan O₂ dan proses standar (tanpa pemisahan gas O₂) sekitar 3.8-7.0 % (1).



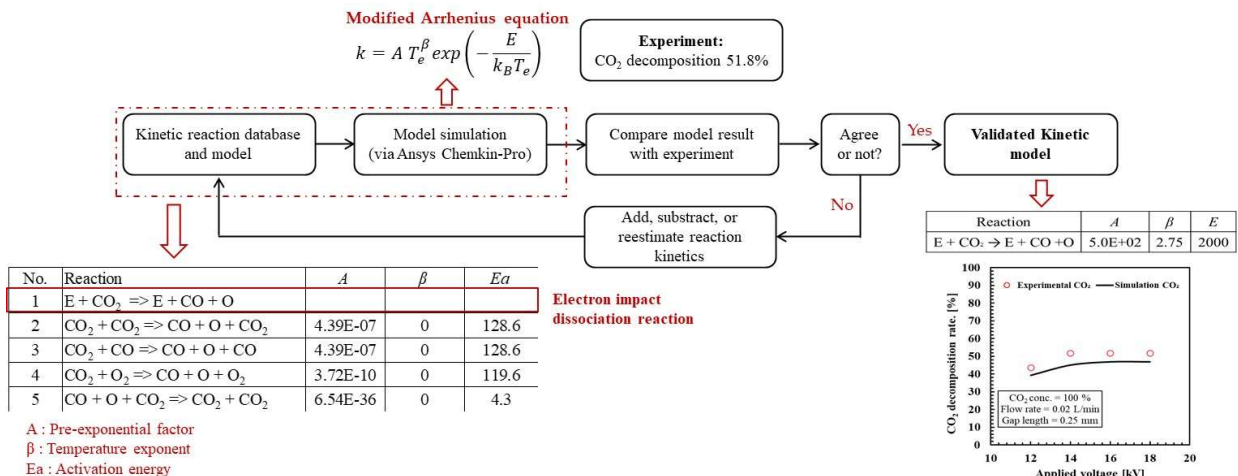
Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh berbagai parameter operasi dan konfigurasi sistem reaktor terhadap performa dekomposisi CO₂ melalui simulasi menggunakan perangkat lunak Ansys Chemkin-Pro. Fokus utama studi ini adalah menganalisis bagaimana pemisahan produk gas (CO dan O₂) dari aliran produk dapat menekan reaksi rekombinasi dan meningkatkan konversi CO₂. Dengan membandingkan sistem standar dengan sistem yang menerapkan pemisahan produk, diharapkan mekanisme dominan dalam pembentukan dan pembelahan CO₂ dapat dipahami lebih mendalam untuk mengoptimalkan desain reaktor plasma di masa depan.

2. Metode Penelitian

2.1 Deskripsi Model Simulasi

Proses validasi model kinetika dekomposisi CO₂ dimulai seperti yang terlihat pada Gambar 1 dimulai dengan penyusunan database reaksi kinetika yang mencakup berbagai reaksi elementer yang ditampilkan pada Tabel 1, seperti reaksi disosiasi akibat tumbukan elektron dan reaksi termal antara molekul gas. Model ini kemudian disimulasikan menggunakan perangkat lunak **Ansys Chemkin-Pro** dengan menerapkan persamaan *Modified Arrhenius* untuk menghitung konstanta laju reaksi (*k*) berdasarkan faktor pre-eksponensial (*A*), eksponen suhu (β), dan energi aktivasi (*E_a*). Hasil simulasi tersebut selanjutnya dibandingkan dengan data eksperimen yang menunjukkan tingkat dekomposisi CO₂ sebesar 51,8% (9).

Apabila hasil simulasi belum sesuai dengan data eksperimen, dilakukan proses iterasi berupa penambahan, pengurangan, atau estimasi ulang terhadap parameter kinetika reaksi hingga tercapai kesepakatan data. Validasi akhir ditunjukkan melalui grafik hubungan antara tegangan terpasang (*applied voltage*) terhadap laju dekomposisi, di mana kurva simulasi menunjukkan tren yang konsisten dengan titik-titik data eksperimen pada kondisi operasional tertentu.



Gambar 1. Metode penelitian untuk mendapatkan pemodelan kinetika reaksi dekomposisi CO₂ menggunakan Ansys Chemkin



Tabel 1. Mekanisme reaksi kimia dengan Plasma menggunakan Ansys Chemkin (10,11)

No	Reaction	A	b	E	No	Reaction	A	b	E
1	$e+CO_2 \rightarrow e+CO+O$	50000	1.5	0	23	$CO+O+M = CO_2+M$	4.39×10^{14}	0	3000
2	$CO_2+CO_2 \rightarrow CO+O+CO_2$	4.39×10^{-7}	0	128.6	24	$e+O_2 \rightarrow O_2+e$	1.41×10^{-4}	-1.5	11594
3	$CO_2+CO \rightarrow CO+O+CO$	4.39×10^{-7}	0	128.6	25	$e+O_2 \rightarrow O+O^*+e$	4.52×10^{-13}	0.9	51069
4	$CO_2+O_2 \rightarrow CO+O+O_2$	3.72×10^{-10}	0	119.6	26	$e+O_2 \rightarrow O_2^*+2e$	3.99×10^{-14}	1.1	137580
5	$CO+O+CO_2 \rightarrow CO_2+CO_2$	6.54×10^{-36}	0	4.3	27	$e+O_2 \rightarrow O+O^-$	3.60×10^{-8}	-0.5	57440
6	$CO+O+CO_2 \rightarrow CO_2+CO_2$	6.54×10^{-36}	0	-3.7	28	$e+O \rightarrow O^*+e$	4.30×10^{-7}	-0.3	38431
7	$CO+O+CO \rightarrow CO_2+CO$	6.54×10^{-36}	0	4.3	29	$e+O \rightarrow O+e$	1.24×10^{-9}	0	60440
8	$O+CO_2 \rightarrow CO+O_2$	7.77×10^{-12}	0	33	30	$e+O \rightarrow O^*+2e$	1.95×10^{-11}	0.6	165410
9	$CO+O_2 \rightarrow CO_2+O$	1.23×10^{-12}	0	25.2	31	$e+O^* \rightarrow O^*+2e$	1.95×10^{-11}	0.6	140000
10	$O_2+O_2 \rightarrow O+O+O_2$	8.14×10^{-9}	0	118.6	32	$e+O \rightarrow O+2e$	2.10×10^{-10}	0.5	39434
11	$O_2+O \rightarrow O+O+O$	2.00×10^{-8}	0	114.9	33	$e+e+O \rightarrow O+e$	1.00×10^{-30}	0	0
12	$O_2+CO \rightarrow O+O+CO$	2.40×10^{-9}	0	118	34	$O+O_2 = O+O_2$	2.80×10^{-7}	0	0
13	$O_2+CO_2 \rightarrow O+O+CO_2$	2.57×10^{-9}	0	111.5	35	$O+O^+ = 2O$	2.80×10^{-7}	0	0
14	$O+O+O_2 \rightarrow O_2+O_2$	6.80×10^{-34}	0	0	36	$O+O \rightarrow O_2+e$	1.40×10^{-10}	0	0
15	$O+O+O \rightarrow O_2+O$	2.19×10^{-33}	0	-4.5	37	$O^*+O_2 = O_2^*+O$	2.10×10^{-11}	0	0
16	$O+O+CO \rightarrow O_2+CO$	2.75×10^{-34}	0	0	38	$O^*+O_2 = O+O_2$	3.20×10^{-11}	0	-67
17	$O+O+CO_2 \rightarrow O_2+CO_2$	2.75×10^{-34}	0	0	39	$O^*+O = O+O$	4.00×10^{-11}	0	0
18	$CO_2+C = CO+CO$	6.00×10^8	0	0	40	$O_2^*+O_2 \rightarrow 2O_2$	4.38×10^{18}	-0.5	0
19	$C_2+O_2 = CO+CO$	5.00×10^{13}	0	0	41	$O_2^*+O_2+M \rightarrow 2O_2+M$	1.70×10^{29}	-2.5	0
20	$CO+O(+M) = CO_2(+M)$	1.80×10^{10}	0	2380	42	$O^*+O_2 \rightarrow O+O_2$	4.17×10^{18}	-0.5	0
21	$O+O+M = O_2+M$	2.90×10^{17}	-1	0	43	$O^*+O_2+M \rightarrow O+O_2+M$	1.70×10^{29}	-2.5	0
22	$CO+O_2 = CO_2+O$	2.50×10^{12}	0	47700					

2.2 Parameter Model Simulasi

Plasma PSR digunakan untuk proses dekomposisi CO_2 menjadi CO dan O_2 , di mana pengaruh dari berbagai parameter, seperti deposisi daya plasma, laju alir gas, waktu tinggal, dan suhu terhadap konversi CO_2 serta efisiensi energi turut dipelajari. Dalam penelitian ini, berfokus pada pengaruh CO dan/atau O_2 terhadap dekomposisi CO_2 . Konfigurasi yang digunakan mencakup 3 reaktor dan setiap reaktor memiliki 10 plasma PSR. Variasi deposisi daya plasma berada pada rentang 30-100 Watt, diikuti dengan pengaruh laju alir gas 0,05-0,3 L/min, waktu tinggal 2, 5, dan 10 detik, pada suhu yang dipelajari sebesar 350-500 K dalam kondisi tekanan atmosfer seperti ditamikan pada Tabel 2.

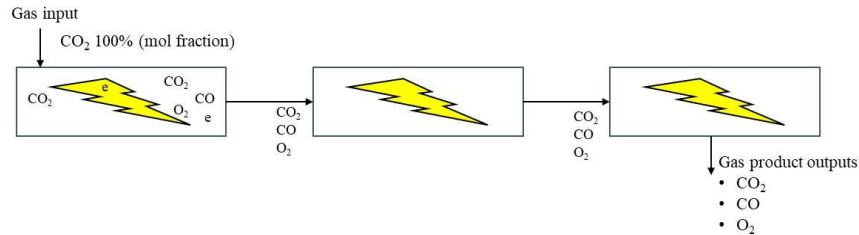
Tabel 2 Kondisi simulasi dan input data proses dekomposisi CO_2 menggunakan plasma

Parameter			
Plasma power (W)	Laju alir gas (L/min)	Temperatur gas (K)	Residence time (s)
30-100	0.2	400	5
100	0.05-0.3	400	5
100	0.2	350-500	5
100	0.2	400	2-10
Sistem Konfigurasi reaktor pada proses dekomposisi CO_2			
Pemisahan CO separation (RS 1)			
Pemisahan O_2 separation (RS 2)			
Pemisahan CO dan O_2 (RS 3)			
Kondisi Standar/tanpa pemisahan (RS 4)			

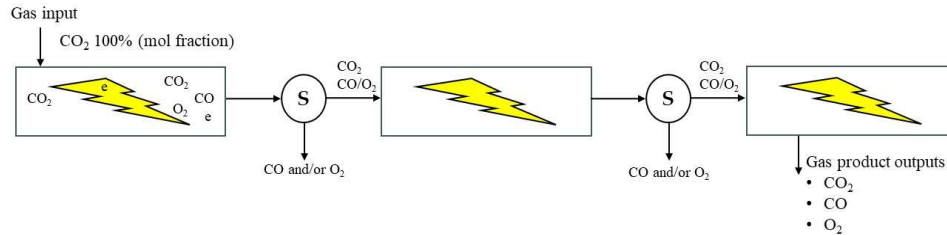


Dalam studi simulasi ini, selama reaktor pertama, gas CO₂ murni mengalir melalui reaktor plasma. Di dalam reaktor, CO₂ ini diubah sebagian menjadi CO dan O₂. Dari sini, konversi selama reaktor pertama dapat ditentukan. Campuran gas keluaran dari reaktor 1, sebelum direplikasi sebagai masukan reaktor 2, terlebih dahulu dipisahkan CO dengan berasumsi bahwa CO terpisah secara sempurna di dalam separator, sehingga hanya CO₂ dan O₂ yang menjadi masukan reaktor 2. Hal ini membentuk campuran masukan yang kami kirim ke reaktor plasma untuk tahap reaktor berikutnya sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2. Pada akhir reaktor, konversi CO₂ dapat ditentukan.

A. Performance of CO₂ decomposition standard method



B. Performance of CO₂ decomposition function of gas product separation method



Gambar 2 Ilustrasi system konfigurasi reactor pada proses dekomposisi CO₂: A. performa dekomposisi CO₂ menggunakan kondisi standar dan B. performa dekomposisi CO₂ menggunakan pemisahan CO dan/atau O₂

Konversi CO₂ diperoleh dengan rumus berikut:

$$X_{CO_2}[\%] = \frac{n_{CO_2(in)} - n_{CO_2(out)}}{n_{CO_2(in)}} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana $n_{CO_2(in)}$ adalah fraksi mol CO₂ tanpa plasma dan $n_{CO_2(out)}$ adalah fraksi mol CO₂ setelah perlakuan plasma. Perlu dicatat bahwa proses dekomposisi hanya mengukur CO dan O₂ sebagai produk. Masukan energi spesifik (*specific energy input* atau SEI) yang merupakan parameter penting untuk menentukan efisiensi energi, didefinisikan sebagai:

$$SEI[kJ/L] = \frac{plasma\ power\ [kW]}{gas\ flow\ rate[L/min]} \times 60 \frac{s}{min} \quad (2)$$

Dimana laju alir gas didefinisikan sebagai liter standar per menit (L/min) dan daya plasma (P) dalam (kW). Efisiensi energi kemudian didefinisikan sebagai:

$$\eta[\%] = \frac{\Delta H_R [kJ/mol] \times X_{CO_2}[\%]}{SEI [kJ/L] \times 22.4\ L/mol} \quad (3)$$

Dimana ΔH_R adalah entalpi reaksi untuk pemisahan CO₂ pada kondisi standar (279.8 kJ/mol).

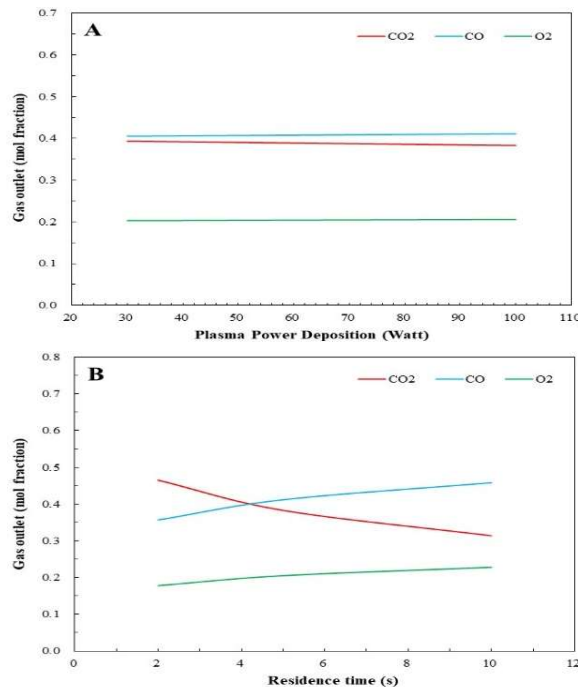


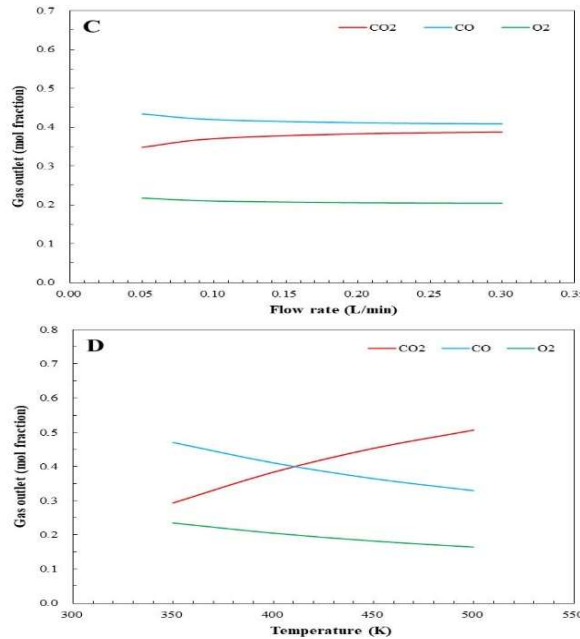
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Kinerja dekomposisi CO₂ menggunakan metode standar: distribusi gas produk.

Simulasi penguraian (dekomposisi) CO₂ dilakukan dengan mengamati berbagai parameter, seperti laju aliran gas, daya plasma, waktu tinggal, dan suhu gas menggunakan CO₂ murni sebagai input seperti yang disajikan pada Gambar 3.a-d. Hasil distribusi gas keluaran menunjukkan bahwa pada daya plasma 30 W, fraksi mol CO₂, CO, dan O₂ masing-masing terdeteksi sebesar 0,393 mol, 0,404 mol, and 0,202 mol. Ketika daya plasma ditingkatkan menjadi 100 W, fraksi mol CO₂ menurun menjadi 0,383 mol, yang diikuti dengan peningkatan fraksi mol CO menjadi 0,411 mol dan O₂ menjadi 0,206 mol. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan daya plasma tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap distribusi gas hasil penguraian CO₂.

Di sisi lain, parameter waktu tinggal memiliki pengaruh yang lebih nyata terhadap distribusi gas tersebut. Seiring bertambahnya waktu tinggal, jumlah CO dan O₂ yang terbentuk semakin meningkat, sementara jumlah CO₂ berkurang secara signifikan. Pada waktu tinggal 2 detik, fraksi mol CO₂, CO, dan O₂ tercatat sebesar 0,466 mol, 0,356 mol, dan 0,178 mol. Saat waktu tinggal diperpanjang menjadi 5 hingga 10 detik, fraksi mol CO₂ terus menurun hingga mencapai 0,383 mol dan 0,314 mol, sementara pembentukan CO meningkat ke kisaran 0,411–0,457 mol dan O₂ ke kisaran 0,209–0,229 mol. Secara keseluruhan, peningkatan waktu tinggal memberikan dampak positif terhadap dekomposisi CO₂ karena memperbesar peluang molekul CO₂ untuk bertabrakan dengan elektron dan spesies tereksitasi lainnya dalam plasma.





Gambar 3. Distribusi keluaran gas selama dekomposisi CO₂: a) efek deposisi daya plasma, b) efek waktu tinggal, c) efek laju aliran gas, dan d) efek suhu

Simulasi ini juga mempelajari bagaimana laju aliran gas memengaruhi dekomposisi CO₂. Parameter ini diuji pada suhu gas tetap 400 K dan daya plasma 100 W dengan waktu tinggal 5 detik, di mana laju aliran gas divariasikan antara 0,05 hingga 0,3 L/min. Hasilnya menunjukkan bahwa pada laju 0,05 L/min, fraksi mol CO₂, CO, dan O₂ masing-masing mencapai 0,349 mol, 0,434 mol, dan 0,217 mol. Namun, seiring meningkatnya laju aliran gas, jumlah CO₂ justru semakin banyak, sementara CO dan O₂ berkurang. Ketika laju aliran naik menjadi 0,1 hingga 0,3 L/min, fraksi mol CO₂ meningkat dari 0,349 menjadi 0,388 mol, sedangkan CO dan O₂ terus menurun. Hal ini terjadi karena peningkatan laju aliran gas memperpendek waktu tinggal CO₂ di area pelepasan listrik (plasma), sehingga peluang CO₂ untuk bertabrakan dengan elektron dan partikel aktif lainnya menjadi lebih kecil. Meskipun demikian, dalam simulasi ini fokus utama tetap pada pengaruh laju aliran gas pada kondisi waktu tinggal yang dibuat konstan.

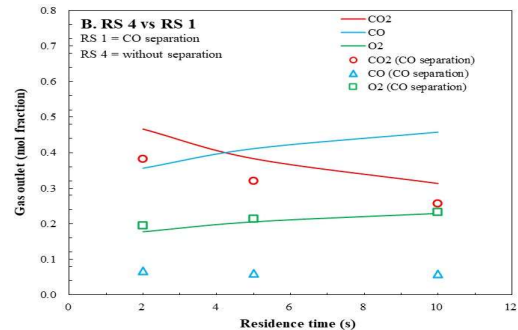
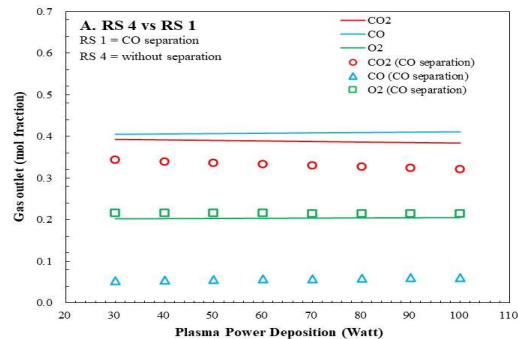
Selanjutnya, pengaruh suhu gas antara 350–500 K juga diamati pada daya plasma 100 W, laju aliran 0,2 L/min, dan waktu tinggal 5 detik. Pada suhu 350 K, fraksi mol CO₂, CO, dan O₂ masing-masing adalah 0,294 mol, 0,471 mol, dan 0,235 mol. Ternyata, kenaikan suhu gas berdampak negatif pada penguraian CO₂. Saat suhu naik menjadi 500 K, jumlah CO₂ melonjak hampir dua kali lipat menjadi 0,505 mol, sementara CO dan O₂ menurun drastis. Hal ini menunjukkan bahwa dalam reaktor plasma non-termal, suhu tinggi justru memicu reaksi balik, di mana CO dan O bergabung kembali membentuk CO₂. Oleh karena itu, sangat penting untuk membuang panas yang dihasilkan oleh plasma agar suhu tetap rendah, sehingga reaksi balik tersebut dapat dicegah dan hasil penguraian CO₂ tetap maksimal.

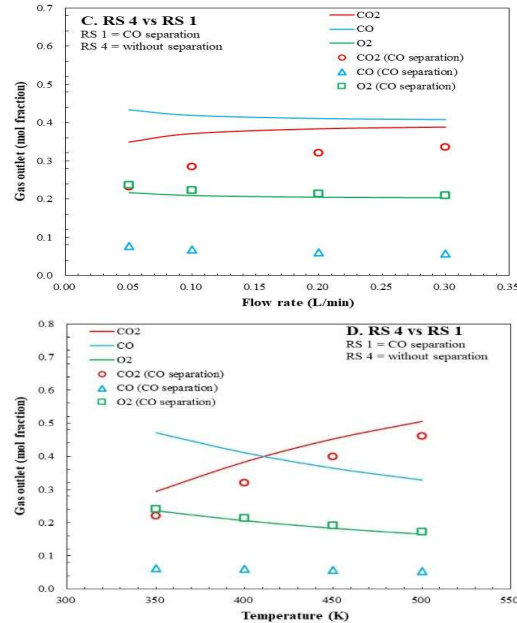


3.2 Berbagai konfigurasi proses dekomposisi CO₂: pengaruh pemisahan O₂ dan CO dari aliran produk.

3.2.1 Pengaruh metode pemisahan CO terhadap distribusi output gas selama proses dekomposisi CO₂.

Sebuah simulasi dilakukan untuk membandingkan kondisi di mana produk gas CO dipisahkan dengan kondisi tanpa pemisahan. Gambar 4.a-d menunjukkan distribusi fraksi mol dari setiap produk gas pada dua metode yang berbeda tersebut, berdasarkan pengaruh daya plasma, laju aliran gas, suhu gas, dan waktu tinggal. Ketika sistem reaktor pertama (RS 1) dijalankan, jumlah akhir CO₂ jauh lebih rendah dibandingkan metode lainnya. Hal ini terjadi karena pemisahan CO berhasil menekan reaksi penggabungan kembali (rekombinasi) menjadi CO₂. Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa memisahkan CO memiliki efek besar dalam menghambat pembentukan kembali CO₂, sehingga meningkatkan efisiensi penguraian CO₂. Pada Gambar 3.a-d, terlihat jelas bahwa konfigurasi RS 1 memberikan hasil penguraian CO₂ yang lebih baik daripada RS 4 pada semua parameter yang diuji. Sebagai contoh, pada daya plasma 30 W, jumlah CO₂ pada RS 1 hanya 0,343 mol, lebih rendah dibanding RS 4 yang mencapai 0,393 mol. Saat daya plasma dinaikkan ke 100 W, jumlah CO₂ pada RS 1 turun lagi menjadi 0,321 mol, tetap lebih rendah daripada RS 4 yang berada di angka 0,383 mol. Selain itu, ketika daya plasma dijaga tetap dan parameter lain (seperti waktu tinggal, laju aliran, dan suhu) diubah-ubah, tren hasilnya tetap sama: RS 1 selalu menghasilkan CO₂ yang lebih sedikit. Sebagai catatan, kita tidak membandingkan jumlah CO antara RS 1 dan RS 4 karena adanya metode pemisahan yang diterapkan. Pada RS 1, jumlah CO jauh lebih kecil (hanya 0,053 mol) dibandingkan RS 4 (0,405 mol) pada kondisi daya 30 W, karena sebagian besar CO memang sengaja dipisahkan dari aliran gas.





Gambar 4. Distribusi keluaran gas selama penguraian CO₂ dengan metode pemisahan CO: a) pengaruh deposisi daya plasma, b) pengaruh waktu tinggal, c) pengaruh laju aliran gas, dan d) pengaruh suhu.

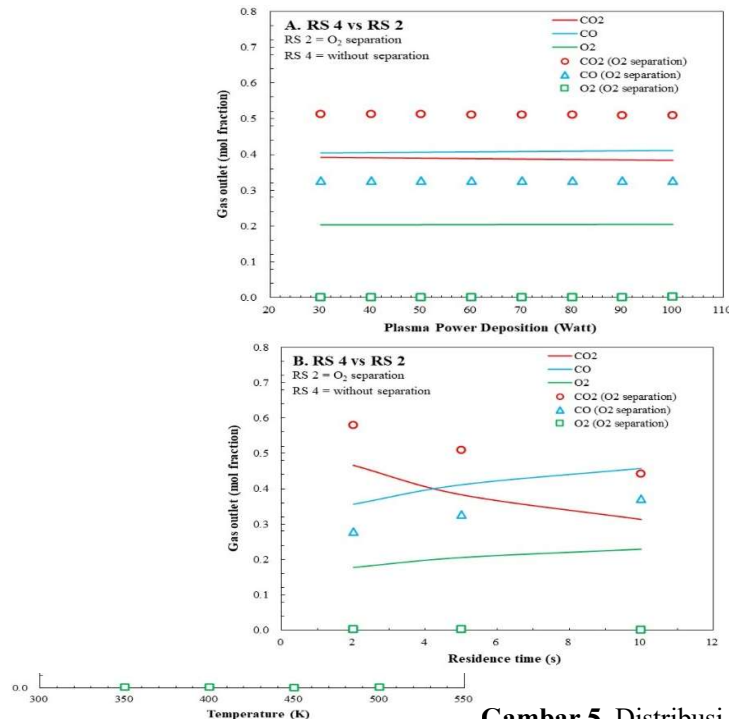
Sejalan dengan hal tersebut, asumsi kami terbukti bahwa memisahkan CO dapat mengurangi kemungkinan terjadinya reaksi penggabungan kembali (rekombinasi) antara CO dengan CO₂ dan/atau O untuk membentuk CO₂. Hal ini terlihat pada Gambar 3, di mana jumlah CO₂ yang terbentuk jauh lebih sedikit jika CO dipisahkan. Karena hanya CO₂ dan O₂ yang tersisa dalam metode pemisahan CO ini, maka reaksi antara CO₂ dengan elektron atau reaksi antara CO₂ dengan O₂ menjadi lebih dominan.

3.2.2 Pengaruh metode pemisahan O₂ terhadap distribusi output gas selama proses dekomposisi CO₂.

Gambar 5 merangkum kinerja metode pemisahan O₂ selama proses penguraian (dekomposisi) CO₂. Simulasi metode pemisahan O₂ (RS 2) ini dipelajari menggunakan parameter yang sama dengan RS 1 dan RS 4, yaitu pengaruh daya plasma, waktu tinggal, laju aliran gas, dan suhu gas. Distribusi fraksi mol dari setiap produk gas kemudian dibandingkan dengan metode tanpa pemisahan. Hasil yang digambarkan pada Gambar 4.a-d menunjukkan bahwa kinerja penguraian CO₂ pada RS 2 justru menurun dibandingkan dengan RS 1 dan RS 4. Terlihat jelas bahwa dalam simulasi RS 2, jumlah CO₂ yang terbentuk lebih banyak, sedangkan CO lebih sedikit. Sebagai contoh, pada Gambar 4.b, dengan waktu tinggal 2 detik, jumlah CO₂ pada RS 2 mencapai 0,580 mol, lebih tinggi daripada RS 4 yang hanya 0,466 mol. Sebaliknya, jumlah CO pada RS 2 lebih rendah (0,279 mol) dibandingkan RS 4 (0,356 mol). Untuk semua parameter yang diteliti, tingginya jumlah CO₂ dan rendahnya \$CO\$ mengindikasikan bahwa setelah O₂ dipisahkan, hanya tersisa CO₂ dan CO sebagai input gas dalam proses tersebut. Kemungkinan besar, saat CO₂ pertama kali bereaksi dengan elektron dan pecah menjadi CO dan O, gas CO yang



sudah ada sebelumnya justru membantu reaksi penggabungan kembali (rekombinasi) melalui reaksi $\text{CO} + \text{O} + \text{CO}$ atau $\text{CO} + \text{O} + \text{CO}_2$ untuk membentuk kembali CO_2 . Hal ini menandakan bahwa pemisahan O_2 memberikan pengaruh negatif terhadap penguraian CO_2 . Namun, hasil simulasi ini rupanya berbeda dengan banyak referensi mengenai penguraian CO_2 melalui plasma, yang umumnya menyatakan bahwa memisahkan atau membuang O_2 seharusnya memberikan pengaruh positif (meningkatkan hasil) pada penguraian CO_2 .



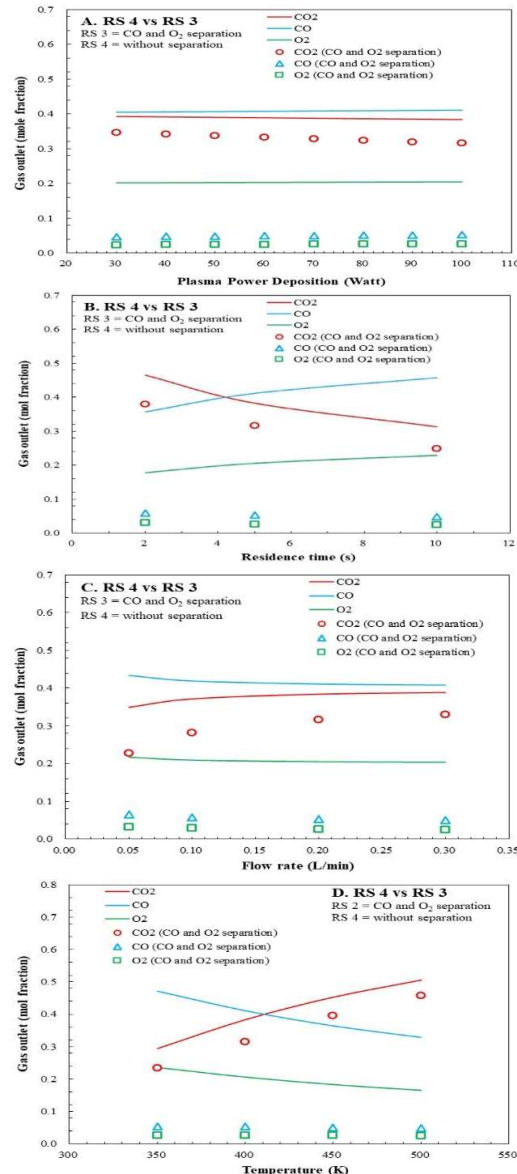
Gambar 5. Distribusi keluaran gas selama penguraian CO_2 dengan metode pemisahan O_2 : a) pengaruh deposisi daya plasma, b) pengaruh waktu tinggal, c) pengaruh laju aliran gas, dan d) pengaruh suhu.

3.2.3 Pengaruh metode pemisahan CO dan O_2 terhadap distribusi output gas selama proses dekomposisi CO_2 .

Pada tahap akhir simulasi, kami mencoba memisahkan CO dan O_2 secara bersamaan dengan tujuan untuk meningkatkan kinerja dekomposisi CO_2 . Berdasarkan parameter pengujian yang sama, hasil pada Gambar 6.a-d menunjukkan bahwa fraksi mol CO_2 pada sistem RS 3 selalu lebih rendah dibandingkan RS 4 di seluruh parameter yang dipelajari. Sebagai contoh, pada daya plasma 100 W, RS 3 berhasil menurunkan fraksi mol CO_2 hingga mencapai 0,316 mol, sementara pada RS 4 jumlah CO_2 yang terbentuk jauh lebih tinggi, yakni 0,383 mol. Jika dibandingkan dengan metode lain, RS 3 yang menerapkan pemisahan CO menunjukkan kinerja dekomposisi CO_2 yang paling unggul. Hal ini terlihat pada laju aliran gas 0,05 L/min, di mana RS 3 mendeteksi CO_2 sebesar 0,228 mol, sedikit lebih rendah daripada RS 1 yang sebesar 0,232 mol. Begitu pula pada waktu tinggal 2 detik, RS 3 menghasilkan CO_2 sebesar 0,380 mol, sedikit mengungguli RS 1 yang



berada di angka 0,381 mol. Meskipun demikian, pada kondisi tertentu seperti daya plasma rendah sebesar 30 W dan suhu gas 350 K, RS 1 sebenarnya menunjukkan kinerja yang sedikit lebih baik daripada RS 3. Secara keseluruhan, analisis fraksi mol CO_2 menunjukkan bahwa pengaruh parameter yang dipelajari tidak memperlihatkan perbedaan yang sangat besar antara RS 1 dan RS 3. Namun, ketika keduanya dibandingkan dengan RS 2 dan RS 4, terlihat perbedaan yang sangat mencolok. Hal ini mengindikasikan bahwa pemisahan CO adalah variabel paling krusial dalam dekomposisi CO_2 , karena kehadiran CO di dalam reaktor memicu reaksi rekombinasi (pembentukan kembali CO_2) menjadi lebih dominan.

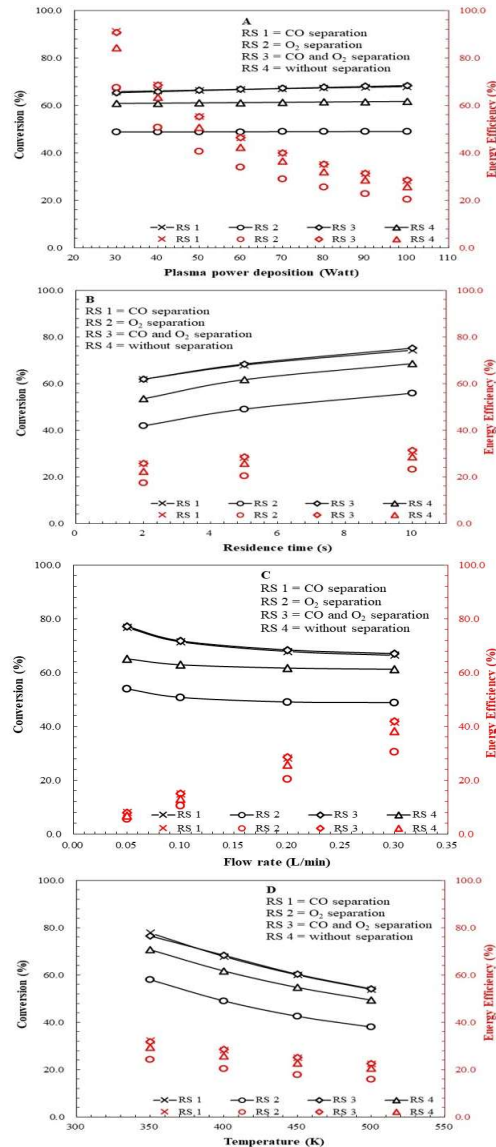


Gambar 6. Distribusi keluaran gas selama penguraian CO_2 dengan metode pemisahan CO dan O_2 : a) pengaruh deposisi daya plasma, b) pengaruh waktu tinggal, c) pengaruh laju aliran gas, dan d) pengaruh suhu.



3.3 Kinerja metode pemisahan produk gas: konversi CO₂ dan efisiensi energi.

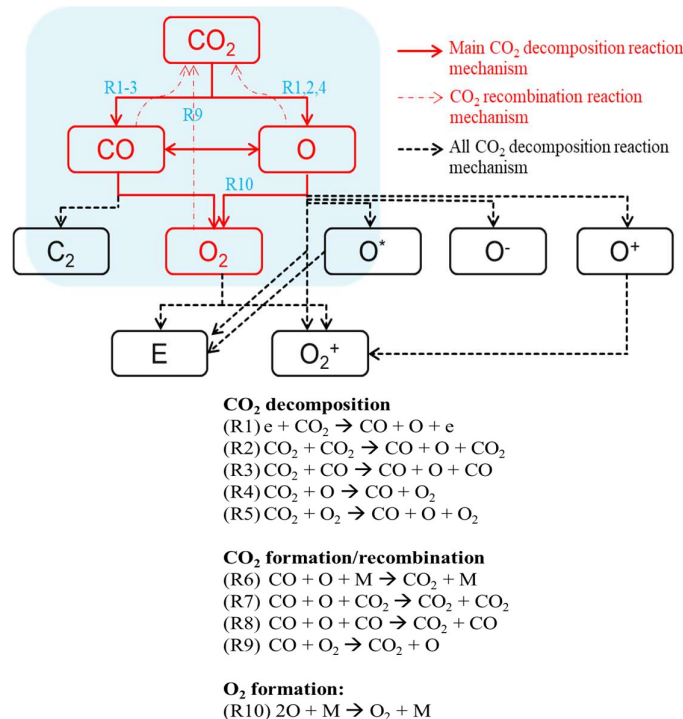
Tingkat konversi CO₂ dan efisiensi energi dalam proses pemisahan menggunakan plasma sangat dipengaruhi oleh berbagai parameter operasional, seperti daya listrik, laju aliran gas, suhu, hingga struktur reaktor yang digunakan. Secara umum, peningkatan daya plasma dan waktu tinggal gas di dalam reaktor dapat meningkatkan konversi CO₂. Namun, hal sebaliknya terjadi pada laju aliran gas dan suhu; kenaikan pada kedua faktor ini justru cenderung menurunkan tingkat konversi seperti ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Konversi CO₂ dan efisiensi energi pada berbagai metode pemisahan dalam penguraian CO₂: a) pengaruh deposisi daya plasma, b) pengaruh waktu tinggal, c) pengaruh laju aliran gas, dan d) pengaruh suhu.



Sebagai contoh, pada metode RS 4 tanpa proses pemisahan, menaikkan daya dari 30 watt ke 100 watt hanya memberikan sedikit kenaikan konversi (dari 60,73% ke 61,67%), namun justru membuat efisiensi energinya anjlok drastis dari 84,28% menjadi 25,68%. Dalam perbandingan berbagai sistem reaktor, metode RS 1 mencatatkan konversi tertinggi sebesar 65,72%, disusul oleh RS 3 (65,39%), RS 4 (60,73%), dan RS 2 (48,69%). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa upaya memisahkan gas hasil (CO dan O_2) di tengah proses penguraian justru memberikan dampak negatif terhadap efektivitas konversi CO_2 , terutama pada metode pemisahan CO . Hal ini dikarenakan ketika CO dipisahkan di tengah jalan, gas yang masuk ke tahap reaksi selanjutnya hanya tersisa CO_2 dan O_2 , yang akhirnya menghambat optimalisasi proses penguraian gas tersebut secara keseluruhan. Selain reaksi utama, terdapat kemungkinan terjadinya reaksi antara CO_2 dan O_2 yang menghasilkan CO ($\text{CO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{O} + \text{O}_2$). Hal ini berbeda dengan asumsi umum di mana O_2 langsung bereaksi dengan CO (hasil penguraian) yang justru memicu reaksi balik pembentukan kembali CO_2 . Penerapan metode pemisahan O_2 ternyata tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap konversi CO_2 . Secara logis, penguraian CO_2 menghasilkan CO dan O ; namun seiring berjalannya proses, CO yang ada berpeluang besar untuk langsung bereaksi kembali dengan CO_2 dan O melalui reaksi $\text{CO} + \text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CO}_2$ and $\text{CO} + \text{O} + \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CO}$. Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 8, hal ini justru mendorong terbentuknya kembali CO_2 dan menghambat kemungkinan terjadinya reaksi antara CO dengan O_2 .



Gambar 8. Urutan kemungkinan reaksi penguraian CO_2 oleh plasma

Berdasarkan klasifikasi pada Gambar 8, penguraian CO_2 oleh plasma dibagi menjadi tiga tahap: reaksi utama yang menghasilkan CO dan O , reaksi kedua berupa



interaksi CO₂ dengan produk utama (CO dan O) yang memengaruhi pembentukan atau pemisahan kembali CO₂, serta reaksi terakhir yang melibatkan interaksi antara CO₂ atau CO dengan O₂. Meskipun banyak peneliti menyebutkan bahwa memisahkan O₂ dapat meningkatkan konversi CO₂ karena mencegah penggabungan kembali (rekombinasi) dengan CO, kondisi dalam penelitian ini ternyata menunjukkan hasil yang berbeda. Di sini, memisahkan O₂ tidak efektif meningkatkan konversi karena CO₂ yang tidak terkonversi justru berinteraksi dengan pasangan CO-O, yang tetap memicu rekombinasi dan menghambat penguraian CO₂. Sebaliknya, pemisahan CO justru terbukti meningkatkan konversi CO₂ secara signifikan. Hal ini terjadi karena reaksi rekombinasi pembentukan kembali CO₂ ternyata lebih banyak melibatkan CO daripada O₂. Dengan memisahkan CO dari sistem, reaksi balik yang membentuk kembali CO₂ dapat ditekan, sehingga proses penguraian menjadi lebih maksimal.

Tabel 3 menyajikan mekanisme penguraian dan pembentukan kembali CO₂, serta seberapa besar pengaruh laju reaksinya terhadap keseluruhan proses. Terlihat jelas bahwa penguraian utama CO₂ oleh plasma didominasi oleh tumbukan elektron (R1) yang memiliki koefisien laju reaksi paling tinggi. Namun, ketika gas CO atau O₂ dipisahkan, laju reaksi dari tumbukan elektron ini menurun dibandingkan dengan konfigurasi reaktor standar (RS 4).

Tabel 3. Proses utama penguraian dan pembentukan CO₂, serta laju reaksinya terhadap total penguraian dan pembentukan CO₂.

Reaction		Reaction rate (mol/cm ³ s)			
		RS 1	RS 2	RS 3	RS 4
CO₂ Splitting					
(R1)	$e + CO_2 \rightarrow CO + O + e$	3.46×10^{-6}	2.51×10^{-6}	1.03×10^{-5}	4.31×10^{-5}
(R2)	$CO_2 + CO_2 \rightarrow CO + O + CO_2$	2.73×10^{-16}	1.80×10^{-16}	5.41×10^{-16}	3.96×10^{-16}
(R3)	$CO_2 + CO \rightarrow CO + O + CO$	1.61×10^{-17}	2.78×10^{-16}	4.74×10^{-17}	8.52×10^{-17}
(R4)	$CO_2 + O \rightarrow CO + O_2$	6.43×10^{-25}	4.96×10^{-24}	1.31×10^{-24}	1.15×10^{-24}
(R5)	$CO_2 + O_2 \rightarrow CO + O + O_2$	1.25×10^{-19}	8.53×10^{-23}	2.03×10^{-20}	3.65×10^{-20}
CO₂ Formation					
(R6)	$CO + O + CO_2 \rightarrow CO_2 + CO_2$	1.36×10^{-16}	9.00×10^{-17}	2.71×10^{-16}	1.98×10^{-16}
(R7)	$CO + O + CO \rightarrow CO_2 + CO$	8.04×10^{-18}	1.39×10^{-16}	2.37×10^{-17}	4.26×10^{-17}
(R8)	$CO + O_2 \rightarrow CO_2 + O$	1.37×10^{-23}	2.55×10^{-25}	3.31×10^{-24}	2.92×10^{-23}

Pengaruh pemisahan gas terhadap laju reaksi juga dipaparkan untuk menjelaskan konfigurasi reaktor mana yang paling berkontribusi pada penguraian CO₂. Laju reaksi pada penguraian CO₂ (R1, R2, dan R4) tidak menunjukkan perbedaan nilai yang mencolok. Namun, ketika CO dipisahkan, terlihat perbedaan besar pada laju reaksi R5 di setiap reaktor; RS 1 menunjukkan koefisien laju R5 tertinggi ($1,25 \times 10^{-19}$ mol/cm³ s) dibandingkan RS 2 ($8,53 \times 10^{-23}$ mol/cm³ s). Hal ini menandakan bahwa O₂ ikut berperan dalam penguraian CO₂ dan membuka peluang CO₂ bereaksi



langsung dengan O₂. Meski begitu, laju reaksi R5 ini masih lebih rendah dibandingkan efek pemisahan O₂ pada reaksi R3.

Ketika O₂ dipisahkan, reaksi yang melibatkan CO menjadi lebih tinggi pada RS 2, yang menunjukkan bahwa pada reaktor tersebut, CO lebih membantu penguraian CO₂ daripada O₂. Laju reaksi R3 ($2,78 \times 10^{-16}$ mol/cm³ s karena efek CO) jauh lebih tinggi daripada R5 ($8,53 \times 10^{-23}$ mol/cm³ s karena efek O₂).

Singkatnya, dalam konteks penguraian CO₂, keberadaan CO memberikan pengaruh positif. Namun, pada reaksi penggabungan kembali (rekombinasi), CO justru lebih banyak memicu reaksi balik (pembentukan kembali CO₂) seperti yang terlihat pada R6, R7, dan R8. Perbedaan nyata efek konfigurasi reaktor pada pembentukan CO₂ terlihat di R7 dan R8: laju reaksi R7 pada RS 1 adalah yang terendah, sementara laju reaksi R8 pada RS 2 adalah yang paling kecil. Kesimpulannya, meskipun penguraian CO₂ lebih dipengaruhi oleh keberadaan CO, pembentukan kembali CO₂ juga jauh lebih didominasi oleh kehadiran CO dibandingkan O₂.

4. Kesimpulan

Pengaruh parameter operasional seperti daya plasma, waktu tinggal, laju aliran gas, dan suhu gas terhadap penguraian CO₂ telah dipelajari melalui simulasi menggunakan perangkat lunak Ansys Chemkin. Perubahan parameter-parameter ini memberikan dampak yang berbeda: peningkatan daya plasma dan waktu tinggal dapat meningkatkan konversi CO₂, sementara peningkatan laju aliran dan suhu gas justru menurunkannya. Pada konfigurasi reaktor standar (RS 4), hasil terbaik yang diperoleh adalah konversi CO₂ sebesar 70,63% dengan efisiensi energi 29,41% (kondisi operasional: daya plasma tetap 100 W, suhu 350 K, laju aliran gas 0,2 L/menit, dan waktu tinggal 5 detik). Evaluasi terhadap konfigurasi reaktor juga dilakukan untuk melihat efek dari pemisahan gas hasil reaksi. Terlihat jelas bahwa memisahkan CO dan O₂ berdampak positif terhadap penguraian CO₂. Jika dibandingkan, pemisahan CO berperan lebih besar dalam menekan reaksi penggabungan kembali (rekombinasi) yang membentuk CO₂. Berdasarkan hasil penelitian, CO menjadi faktor utama yang memicu pembentukan kembali CO₂ saat bergabung dengan atom O (R6 dan R7). Meskipun kehadiran O₂ juga memengaruhi reaksi rekombinasi tersebut (R8), koefisien laju reaksinya masih lebih rendah dibandingkan dengan keterlibatan CO.



Lampiran Curriculum Vite:

Educational Background

Month Year	Descriptions
Aug. 2012- Aug. 2016	(Indonesia) Chemical engineering, Faculty of industrial engineering, Bung Hatta University, Padang. (Bachelor's degree) Thesis: Preliminary design of Monosodium Glutamate from Molasses with a capacity 30.000 Tons/year.
Apr. 2018- Marc. 2020	(Japan) Natural science and technology, Energy engineering, Gifu University. (Master's degree) Thesis: Thermodynamic equilibrium and experimental analysis on the leaching process of toxic elements from coal fly ash
Apr. 2020- Marc. 2023	(Japan) Engineering science, Energy engineering, Gifu University. (Doctoral degree) Dissertation: Gas-Solid partitioning of trace elements in coal combustion and their leaching behavior from solid phase

Work Experience

Month Year	Descriptions
Aug. 2015- Feb 2018	Universitas Bung Hatta Teaching assistance 1. Supported the student to understand the lesson as a mentor for Chemical Engineering Mathematics and Basic Concept Biotechnology course. 2. Supported Professor by helping supervise classroom activities, working with the student on an individual, small group or whole class basis.
Oct 2020- March 2024	Universitas Bung Hatta Teaching assistance and guest lecture 1. Giving an online lecture of Chemical Engineering Mathematics, Basic Concept Biotechnology, and Principle of Chemical Engineering course under Prof. Dr. Eng Reni Desmiarti, ST, MT guidance and mentoring the student for their final project test.
July 2024- present	Universitas Bung Hatta lecture Giving an online lecture of Chemical Engineering Mathematics, Basic Concept Biotechnology, and Principle of Chemical Engineering course.



Research Experience

Month Year	Descriptions
Feb. 2017	<p>Drinking water treatment by inductively couple plasma system</p> <p>Background: Inductively coupled plasma system was used in drinking water treatment system to remove the microorganisms in water such as total coliforms (TC), fecal coliforms (FC) and other coliforms (OC) from river water.</p> <p>Publication:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Drinking water treatment by inductively couple plasma system to remove microorganism in river water (MATEC Web of conferences, Q3, January 2018), co-author. 2. Behavior of microorganism in drinking water treatment by inductively couple plasma system: Case study in ground water (AIP conference proceedings, Q3, February 2018), co-author.
Apr. 2018- Marc. 2023	<p>Gas-Solid portioning behavior of trace elements in coal combustion and their leaching behavior from solid phase</p> <p>Background: The issues of trace elements during coal combustion has been concerned in recent year due to their environmental pollution and produce coal fly ash. In order to be able to address these problems and to develop suitable systems to their reduction, it is necessary to understand trace element behavior during the coal combustion and leaching processes. From this problem, we focus on control the trace elements and study the mechanism of inhibition using computation thermodynamic simulation FactSage version 7.2. Based on this study, we published the results to reputed journal and international proceeding.</p> <p>International proceeding:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Investigation of additive blending ratio for controlling boron and fluorine from coal fly ash (12th Asia-Pacific conference on combustion ASPACC2019-1356, Fukuoka, Japan, 2019), co-author. 2. Calcium and arsenic interaction during leaching process of coal fly ash: Analysis by FactSage (12th Asia-Pacific conference on combustion ASPACC2019-1265, Fukuoka, Japan, 2019), first author. <p>Publication:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Coal fly ash characterization from cement industry "X" as an initial study in its utilization (Chemica Jurnal Teknik Kimia, Sinta 3, June 2020), co-author. 2. Effect of additive material on controlling chromium (Cr) leaching from coal fly ash (Minerals Journal Q2, June 2020), co-author. 3. An experimental and thermodynamic equilibrium analysis on the leaching process of arsenic (As) from coal fly ash (Journal of the Japan Institute of Energy Q4, August 2021), first author. 4. A role of mineral oxides on trace elements behavior during pulverized coal combustion (Minerals Journal Q2, November 2021), first author. 5. Influenced of blending high Ca additive on environmental safety of B, F, and Se: A case study from thermodynamic calculation (Environments Journal Q1, December 2023), first author.



Apr. 2023- March 2025	<p>CO₂ decomposition and reduction process using atmospheric pressure plasma Synthesis of Urea with NH₃ and CO/CO₂ mixtures by Ansys Chemkin</p> <p>Background: Reduction in emission of CO₂ is required as it is one of the major causes of climate change. In Japan, carbon recycling technology is being developed to convert CO₂ into valuable of CO and O₂. In our laboratory, as part of carbon recycling technology, the technology to decompose CO₂ using atmospheric pressure plasma has been developed. The influence of plasma power, residence time, gas flow rate, gas temperature as operating parameter on CO₂ decomposition was studied trough simulation using Ansys Chemkin software.</p> <p>Publication:</p> <ol style="list-style-type: none">1. Enhance the CO₂ conversion at atmospheric pressure plasma: influence of
--------------------------------	--

