

STUDI LITERATUR: POTENSI SINTESIS Na_2CO_3 DAN CaCO_3 MELALUI ABSORPSI CO_2 PADA GAS HASIL PIROLISIS LIMBAH TONGKOL JAGUNG

Eka Rodhliatus Sholihah dan Eko Naryono

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

ekarodhliatus@gmail.com ; eko.naryono@polinema.ac.id

ABSTRAK

Limbah tongkol jagung merupakan salah satu biomassa pertanian yang melimpah di Indonesia namun belum dimanfaatkan secara optimal. Melalui proses pirolisis, limbah ini dapat diubah menjadi energi dan menghasilkan gas pirolisat yang mengandung karbon dioksida (CO_2) dalam jumlah signifikan. Studi ini bertujuan untuk mengkaji potensi sintesis natrium karbonat (Na_2CO_3) dan kalsium karbonat (CaCO_3) melalui proses absorpsi CO_2 dari gas hasil pirolisis tongkol jagung menggunakan larutan NaOH dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Kajian dilakukan melalui metode studi literatur dengan meninjau berbagai penelitian terdahulu. Variabel bebas yang dikaji meliputi jenis absorbent, konsentrasi larutan, rasio mol absorbent terhadap CO_2 , dan waktu kontak. Variabel terikat meliputi efisiensi penyerapan CO_2 , pH larutan, serta jumlah produk karbonat yang terbentuk. Hasil kajian menunjukkan bahwa larutan NaOH cenderung memiliki efisiensi penyerapan CO_2 lebih tinggi dibanding $\text{Ca}(\text{OH})_2$, namun $\text{Ca}(\text{OH})_2$ menghasilkan endapan padat CaCO_3 yang bernilai guna tinggi. Efisiensi proses dipengaruhi oleh konsentrasi larutan, pH, dan laju alir gas CO_2 . Secara umum, penyerapan CO_2 dengan NaOH cenderung lebih cepat karena kelarutan tinggi dan reaktivitasnya, sementara $\text{Ca}(\text{OH})_2$ lebih sesuai untuk pembentukan produk karbonat padat. Kesimpulannya, proses penangkapan CO_2 dari hasil pirolisis tongkol jagung melalui absorpsi kimia tidak hanya berpotensi mengurangi emisi karbon, tetapi juga menghasilkan senyawa karbonat yang bernilai ekonomi dan ramah lingkungan.

Kata kunci: absorpsi, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH, pirolisis, tongkol jagung

ABSTRACT

Corn cob waste is one of the abundant agricultural biomass resources in Indonesia, but it has not been optimally utilized. Through the pyrolysis process, this waste can be converted into energy and produce pyrolysis gas containing a significant amount of carbon dioxide (CO_2). This study aims to investigate the potential for synthesizing sodium carbonate (Na_2CO_3) and calcium carbonate (CaCO_3) through the process of CO_2 absorption from corn cob pyrolysis gas using NaOH and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solutions. The study was conducted using the literature review method, examining various previous studies. The independent variables studied include the type of absorbent, solution concentration, the molar ratio of absorbent to CO_2 , and contact time. The dependent variables include CO_2 absorption efficiency, solution pH, and the amount of carbonate product formed. The study results indicate that NaOH solution tends to have higher CO_2 absorption efficiency compared to $\text{Ca}(\text{OH})_2$, but $\text{Ca}(\text{OH})_2$ produces a high-value solid CaCO_3 precipitate. Process efficiency is influenced by solution concentration, pH, and the flow rate of CO_2 gas. Generally, CO_2 absorption with NaOH tends to be faster due to its high solubility and reactivity, while $\text{Ca}(\text{OH})_2$ is more suitable for the formation of solid carbonate products. In conclusion, the process of capturing CO_2 from corn cob pyrolysis products through chemical absorption not only has the potential to reduce carbon emissions but also produces economically valuable and environmentally friendly carbonate compounds.

Keywords: absorption, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH, pyrolysis, corncob

Corresponding author: Eko Naryono

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang

Jl. Soekarno-Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

E-mail: eko.naryono@polinema.ac.id



1. PENDAHULUAN

Tongkol jagung merupakan limbah pertanian yang dihasilkan dalam jumlah besar di Indonesia seiring tingginya produksi jagung nasional. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS) produksi jagung di Indonesia pada tahun 2024 mencapai sekitar 15.138.912 ton [1]. Dari jumlah ini, diperkirakan 15-20% adalah tongkol jagung, persentase ini ekuivalen dengan 2,28 hingga 3,04 juta ton merupakan limbah tongkol jagung yang dihasilkan per tahunnya. Tongkol jagung memiliki kandungan senyawa karbon yang cukup tinggi, yaitu selulosa (41%) dan hemiselulosa (36%), serta kadar abu yang rendah (0,91%) yang mengindikasikan bahwa tongkol jagung berpotensi sebagai bahan pembuatan arang aktif [2]. Limbah tongkol jagung yang langsung dibakar secara terbuka, dianggap mengabaikan potensi energi dan nilai tambahnya, tetapi juga menimbulkan masalah pencemaran udara yang salah satunya adalah CO₂, yang menyebabkan efek rumah kaca.

Berdasarkan uraian di atas diperlukan pengembangan teknologi pengolahan lebih lanjut yang dapat memaksimalkan manfaat tongkol jagung dan ramah lingkungan. Pada penelitian oleh K. Ridhuan dan J. Suranto (2017) menunjukkan bahwa proses pembakaran seperti karbonasi hanya menghasilkan satu produk, yaitu arang, sementara gas buang yang mengandung polutan dibiarkan terlepas ke udara tanpa pemanfaatan lebih lanjut. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan pengolahan yang lebih ramah lingkungan dan bernilai tambah, yang salah satunya adalah proses pirolisis [3].

Pirolisis merupakan proses dekomposisi kimia dari zat organik melalui pemanasan tanpa adanya atau dengan oksigen terbatas sehingga menghasilkan *bio-oil*, *biochar*, dan gas *syngas* seperti karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), hidrogen (H₂), dan metana (CH₄). Penelitian Wijayanti, dkk. (2013) melakukan penelitian terhadap gas yang dihasilkan dari proses pirolisis campuran biomassa bambu, kayu mahoni, dan bark. Kandungan biomassa bambu dinilai menyerupai kandungan biomassa tongkol jagung, sehingga didapatkan gas CO sebanyak 27-30%, CO₂ 25-30%, H₂ 5-8%, dan CH₄ 5-8% [4]. Penelitian yang dilakukan oleh Cao, dkk. (2004), bahwa pirolisis tongkol jagung menghasilkan asap cair sekitar 34-40,96%, gas 27-40,96%, dan arang 23,6-31,6% [5]. Meskipun proses pirolisis memiliki potensi untuk menghasilkan energi bersih, gas buang yang dihasilkan jika tidak ditangani dengan baik, dapat berpotensi mencemari lingkungan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, konsep penangkapan dan penyimpanan CO₂ perlu diterapkan. Konsep ini biasa dikenal dengan *Carbon Capture and Storage* (CCS) yang dikembangkan lagi menjadi *Carbon Capture Utilization Storage* (CCUS). Pada CCUS, karbon yang diperoleh tidak lagi hanya disimpan, tapi juga dikonversi menjadi bahan baku karbon yang dapat diperbarui [6].

Salah satu metode penangkapan CO₂ yang ekonomis dan efektif adalah metode absorpsi kimia menggunakan larutan basa, seperti NaOH dan Ca(OH)₂, yang bereaksi dengan CO₂ membentuk senyawa karbonat seperti Na₂CO₃ atau CaCO₃. Teknik penyerapan CO₂ telah banyak diteliti sebagian besar penyerapan CO₂ dari biogas. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan potensi besar metode ini seperti pada penelitian P. Adhi dan R. Wijaya (2018) menemukan bahwa peningkatan konsentrasi larutan Ca(OH)₂ meningkatkan efisiensi penyerapan CO₂. Penyerapan CO₂ dari biogas cenderung lebih tinggi karena konsentrasi gas CO₂ lebih besar. Variabel terbaik pada sampel laju alir Ca(OH)₂ 400mL/menit memiliki rasio mol 1,644 dengan penyerapan CO₂ 68,350% [7]. Pada penelitian Wicahyono (2017) melakukan perbandingan kinerja purifikasi pada biogas menggunakan NaOH dan Ca(OH)₂ sebagai

absorben. Hasil penelitian tersebut menunjukkan larutan NaOH dan Ca(OH)_2 dapat menyerap kandungan karbondioksida (CO_2) yang ada dalam biogas. Perbandingan Efisiensi penyerapan CO_2 menggunakan larutan NaOH dan Ca(OH)_2 adalah larutan NaOH memiliki efisiensi penyerapan tertinggi pada fraksi Volume 50% yaitu sebesar 91,288%. Sedangkan larutan Ca(OH)_2 memiliki efisiensi penyerapan tertinggi pada fraksi volume 0.07% yaitu sebesar 68,108% [8]. Penelitian serupa juga dilakukan oleh Purba, dkk. (2021) yaitu purifikasi biogas dengan cara menyerap kandungan CO_2 menggunakan larutan Ca(OH)_2 dan NaOH sebagai penyerap dalam kolom gelembung. Dalam perbandingan antara dua larutan penyerap, NaOH menunjukkan efisiensi penyerapan CO_2 yang lebih tinggi dibandingkan Ca(OH)_2 . Penyerapan optimum menggunakan NaOH mencapai 90,660% sedangkan Ca(OH)_2 hanya mampu menyerap CO_2 hingga 70,178%. Kondisi terbaik dicapai pada tinggi larutan 63 cm dengan sparger berdiameter 1 mm [9].

Penelitian sebelumnya menunjukkan pemanfaatan gas CO_2 melalui penyerapan NaOH dan Ca(OH)_2 dapat menjadi solusi ketersediaan Na_2CO_3 untuk industri di Indonesia. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik Indonesia, pada tahun 2023 jumlah kebutuhan natrium karbonat mencapai 2.039.431 ton sementara impor mencapai 801.627 ton [10]. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS), produksi batu kapur nasional pada tahun 2023 mencapai 9.901.294 m^3 berasal dari kegiatan penambangan. Aktivitas ini, apabila dilakukan secara terus-menerus tanpa pengelolaan yang baik, dapat berdampak buruk terhadap lingkungan [11].

Untuk itu, dibutuhkan pendekatan yang lebih berkelanjutan, salah satunya melalui sintesis CaCO_3 dari gas CO_2 yang diserap menggunakan larutan Ca(OH)_2 . Melihat potensi pasar dan kebutuhan dalam negeri, pengembangan hilirisasi industri kalsium karbonat di Indonesia menjadi penting, tidak hanya untuk mengurangi ketergantungan terhadap impor, tetapi juga untuk mendorong peningkatan nilai tambah dan pendapatan nasional.

Studi literatur pada artikel ini bertujuan untuk mengkaji potensi sintesis natrium karbonat (Na_2CO_3) dan kalsium karbonat CaCO_3 melalui proses absorpsi CO_2 dari gas hasil pirolisis tongkol jagung menggunakan larutan NaOH dan Ca(OH)_2 . Hasil kajian ini akan digunakan sebagai dasar untuk menyusun proposal rencana penelitian penyerapan CO_2 pada gas pirolisis tongkol jagung. Pemilihan tongkol jagung sebagai bahan baku didasarkan pada ketersediaannya yang melimpah di Indonesia serta kandungan karbon organik yang tinggi. Kajian ini disusun dengan pendekatan studi literatur, yaitu dengan mengumpulkan dan menganalisis hasil-hasil penelitian sebelumnya yang relevan. Fokus pembahasan artikel ini meliputi: (1) karakteristik tongkol jagung sebagai bahan baku pirolisis, terutama komposisi penyusun dan potensi gas CO_2 yang dihasilkan dari proses termal. (2) mekanisme reaksi dan perbandingan efisiensi absorpsi CO_2 oleh larutan NaOH dan Ca(OH)_2 dengan mengkaji variabel-variabel seperti pH, konsentrasi larutan, rasio mol, serta waktu kontak. Hasil dari kedua pembahasan utama dalam studi literatur ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam menyusun proposal penyerapan CO_2 dari pirolisis tongkol jagung, penentuan variabel yang akan dilanjutkan dengan penelitian

2. METODOLOGI KAJIAN

2.1 Metode dan Prosedur Kajian

Artikel ilmiah ini disusun menggunakan metode studi literatur yang mencakup tahap pengumpulan referensi ilmiah, analisis data dari berbagai sumber relevan, evaluasi hasil-hasil penelitian sebelumnya. Hasil dari studi literatur ini digunakan sebagai dasar dalam penyusunan rencana proposal yaitu penentuan variabel, jenis absorben dan rasio massa tongkol jagung terhadap volume absorben. Penentuan variabel-variabel tersebut didasarkan pada efisiensi penyerapan CO_2 dan kualitas produk hasil reaksi yang dilaporkan dalam literatur. Penyusunan proposal penelitian yang didasarkan hasil studi literatur yang relevan, diharapkan lebih terarah karena didasarkan pada penelitian terdahulu.

2.2 Teknik Pengumpulan dan Evaluasi Data

Artikel ini mengkaji beberapa variabel bebas, yaitu jenis absorben yaitu NaOH dan Ca(OH)_2 , konsentrasi absorben, rasio mol, dan waktu kontak. Variabel terikat mencakup konsentrasi Na_2CO_3 , pH, jumlah padatan Na_2CO_3 dan CaCO_3 yang terbentuk, dan efisiensi penyerapan CO_2 . Analisis data dilakukan secara komparatif, yaitu dengan membandingkan temuan dari berbagai studi guna mengidentifikasi kesamaan dan perbedaan hasil yang diperoleh.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik Tongkol Jagung Sebagai bahan Baku Pirolisis

Tongkol jagung merupakan limbah tanaman jagung. Proporsi biomassa jagung dari tongkol adalah 20% [12]. Berdasarkan Badan Pusat Statistik produksi jagung di Indonesia pada tahun 2024 mencapai sekitar 15.138.912 ton. Dari jumlah ini, diperkirakan 15-20% adalah tongkol jagung, yang artinya sebanyak 2,28 hingga 3,04 juta ton limbah tongkol jagung dapat dimanfaatkan setiap tahunnya [1]. Komposisi kimia tongkol jagung mengandung selulosa (41,32%), hemiselulosa (36,32%), lignin (13,32%), serta kadar abu rendah sekitar 0,91% [2]. Kandungan karbon tetap yang tinggi dan rendahnya kadar abu menunjukkan bahwa tongkol jagung merupakan biomassa yang baik untuk arang aktif karena mampu menghasilkan produk karbon padat serta gas volatil dalam jumlah signifikan [2].

Tabel 1. Komposisi dasar dan sifat fisik tongkol jagung [13]

C (wt%)	H (wt%)	O (wt%)	N (wt%)	S (wt%)	Ash (wt%)	Moisture (wt%)	HHV (Mj/kg)	Referensi
49,32	5,35	44,70	0,63	-	1,49	7,36	16,66	[13]
48,22	8,70	48,22	0,53	-	0,78	<10	22,48	[14]
43,81	6,54	48,19	0,77	0,69	1,05	7,14	16,00	[15]
43,81	6,54	48,19	0,77	0,69	1,05	7,14	16,46	[16]
44,40	5,60	48,27	0,43	1,30	8,50	5,10	18,02	[17]
39,88	6,56	-	0,94	-	2,58	12,44	-	[18]
46,20	5,50	47,60	0,90	-	8,70	8,40	16,88	[19]
49,50	4,90	43,85	0,30	0,08	1,77	7,77	17,00	[20]
47,60	6,10	45,78	0,52	-	2,12	10,1	18,56	[21]
42,00	6,70	48,10	1,50	-	1,50	14,1	18,10	[22]
46,74	5,46	34,16	3,83	0,12	1,14	8,55	17,09	[23]

C (wt%)	H (wt%)	O (wt%)	N (wt%)	S (wt%)	Ash (wt%)	Moisture (wt%)	HHV (Mj/kg)	Referensi
36,40	6,20	47,10	0,50	0,05	9,80	11,00	15,40	[24]
48,00	6,04	43,00	0,77	0,13	1,27	4,33	-	[25]
43,58	6,44	49,30	0,67	0,001	1,05	7,14	20,00	[26]
43,06	4,04	36,14	1,13	0,25	7,98	10,21	12,34	[27]
46,20	5,42	47,22	0,92	0,24	10,67	11,74	18,36	[28]
44,61	6,23	47,88	0,26	1,02	2,70	3,05	-	[29]
46,58	5,87	45,46	0,47	0,01	1,80	1,7	18,30	[30]
43,81	6,53	48,39	1,27	-	17,09	3,43	-	[31]
43,93	6,12	49,37	0,58		2,54	6,91	-	[32]
48,60	5,56	44,29	0,30	0,30	2,07	11,66	18,86	[33]
41,26	5,96	51,71	0,45	0,62	3,23	-	15,99	[34]
47,26	5,79	43,23	0,56	0,05	2,24	0,87	-	[35]
46,21	6,01	45,87	1,91	-	11,70	8,40	-	[36]

(lanjutan)

Berdasarkan Tabel 1, komposisi senyawa dalam tongkol jagung mencakup unsur C, H, N, O, S, kadar abu, dan kadar air. Komposisi-komposisi ini mempengaruhi nilai *Higher Heating Value* (HHV) dari tongkol jagung, yang mengacu pada jumlah energi panas yang dilepaskan selama proses pembakaran dan mencerminkan kandungan kalori tongkol jagung. Sementara itu, energi yang dibutuhkan untuk menguapkan air dalam biomassa disebut dengan *Low Heating Value* (LHV) [13].

Tabel 2. Karakteristik biomassa untuk pirolisis tongkol jagung [37]

Jenis Bahan	Ukuran Partikel (mm)	Kadar Air (% berat)	Suhu (°C)	Heating Rate (°C/min)	Bio-oil (%)	Biochar (%)
Tongkol jagung	0,435-0,6	7,36	400-450	7-40	7,99-21,05	67,84-72,8

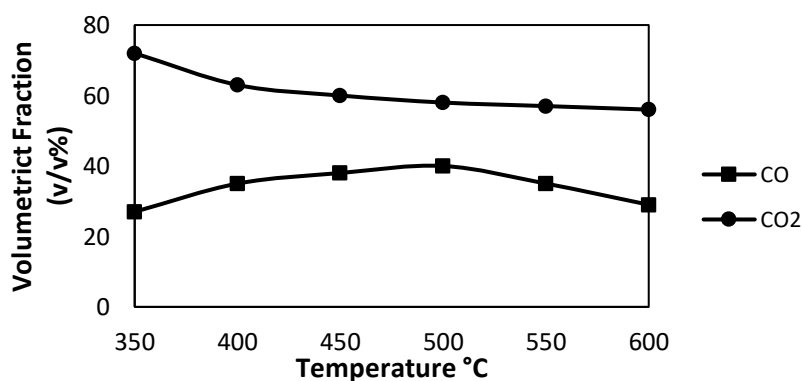
Hasil pirolisis tongkol jagung menghasilkan tiga fraksi utama, yaitu biochar, bio-oil, dan gas [37]. Tabel 2 menunjukkan persentase produk padatan (biochar) yang lebih tinggi dibandingkan bio-oil menunjukkan bahwa tongkol jagung memiliki potensi besar sebagai bahan baku pembuatan arang aktif. Selain itu, fraksi gas yang dihasilkan dari proses pirolisis umumnya terdiri dari campuran gas-gas seperti karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan etilena (C₂H₄). Kandungan gas ini menunjukkan bahwa pirolisis tongkol jagung tidak hanya menghasilkan energi padat, tetapi juga gas yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar atau ditangkap untuk keperluan lain seperti penyerapan CO₂.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh B. Sudarmanta dan A. Adrieq (2016) menggunakan tongkol jagung sebagai umpan dan variasi pada AFR (rasio udara dan bahan bakar), ditemukan bahwa rasio perbandingan udara dan bahan bakar yang paling optimal untuk proses pembakaran adalah 1,05. Penelitian tersebut menghasilkan syngas dengan komposisi H₂ = 13,29%, CO₂ = 8,33%, CO = 10,52%, CH₄ = 1,4%, dan C₂H₆ = 0,08% [38].

Penelitian yang dilakukan oleh Cao,dkk. (2004) mengkaji komposisi gas dan cairan yang dihasilkan dari pirolisis tongkol jagung pada suhu di bawah 600 °C dengan laju pemanasan

30 K/menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu pirolisis, maka jumlah produk padat dan cair cenderung menurun, sementara jumlah produk gas meningkat. Komposisi produk pirolisis mencakup fraksi cair sekitar 34–40,96% (berdasarkan berat), fraksi gas sebesar 27–40,96%, dan fraksi padat (biochar) sebanyak 23,6–31,6% [5].

Gas yang dihasilkan dianalisis menggunakan kromatografi gas (GC), yang menunjukkan kandungan utama berupa CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_3H_6 , dan C_3H_8 . Pada suhu 350–400 °C, komponen gas didominasi oleh CO_2 dan CO dengan proporsi mencapai 80–95% dari total volume. Sementara itu, produk cair diidentifikasi menggunakan GC–MS dan diketahui mengandung senyawa seperti fenol, 2-furanmetanol, dan 2-siklopentanedion.



Gambar 1. Pengaruh suhu terhadap gas CO dan CO_2 [5]

Berdasarkan Gambar 1, terlihat bahwa gas CO_2 merupakan komponen dominan yang dihasilkan dari pirolisis tongkol jagung, dengan fraksi volume mencapai lebih dari 60% pada berbagai rentang suhu pirolisis antara 350–600°C. Konsentrasi CO_2 yang tinggi ini menunjukkan bahwa proses pirolisis tongkol jagung, meskipun menghasilkan energi terbarukan, juga berkontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca. Oleh karena itu, perlu dilakukan upaya mitigasi melalui penangkapan dan pemanfaatan CO_2 . Salah satu metode yang efektif adalah dengan proses absorpsi menggunakan larutan basa, seperti natrium hidroksida atau kalsium hidroksida. Proses ini tidak hanya dapat menurunkan emisi CO_2 , tetapi juga memungkinkan pembentukan produk turunan bernilai tambah seperti Na_2CO_3 atau CaCO_3 . Dengan kandungan CO_2 sebesar 60% dari gas pirolisis, tongkol jagung merupakan bahan baku yang layak untuk proses penyerapan karbon melalui absorben basa.

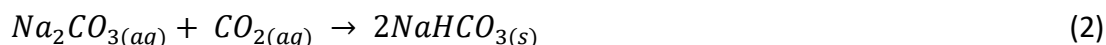
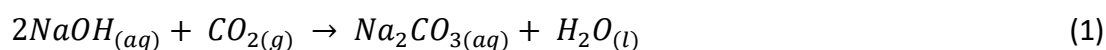
Dengan kandungan CO_2 sebesar 60% dari total gas pirolisis, tongkol jagung merupakan bahan baku yang layak untuk proses penyerapan karbon menggunakan absorben basa. Berdasarkan persamaan reaksi stoikiometri (1) dan (2) reaksi antara CO_2 dengan absorben, dapat dihitung untuk pirolisis setiap 1 kg tongkol jagung dengan kandungan CO_2 sebesar 60%, akan dihasilkan sekitar 9,11 mol CO_2 . Kebutuhan absorben sebanyak 18,22 mol NaOH , jika digunakan larutan sebanyak 2L maka konsentrasi yang dibutuhkan yaitu 9,11M. Umumnya larutan NaOH 2–5 M cukup optimal untuk proses absorpsi. Jika terlalu besar konsentrasinya dikhawatirkan berbahaya karena sifatnya yang cukup korosif. Untuk absorben $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang kelarutannya terbatas (sekitar 1,7 gram/L pada 25°C), kebutuhan volume larutan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sebesar 396,5L.

Meskipun Ca(OH)_2 memerlukan volume larutan yang lebih besar dibandingkan NaOH pada konsentrasi tertentu, namun Ca(OH)_2 memiliki keunggulan dalam hal keamanan, biaya yang lebih rendah, dan produk samping berupa CaCO_3 yang stabil serta dapat dimanfaatkan lebih luas di sektor industri. Perhitungan kebutuhan absorben ini memberikan dasar penting dalam penentuan variabel operasi pada eksperimen lanjutan, seperti konsentrasi larutan, volume absorben, serta kapasitas sistem penangkapan CO_2 , sehingga proses dapat dioptimalkan untuk mencapai efisiensi yang tinggi dengan biaya operasional yang rasional.

3.2. Mekanisme Reaksi Absorpsi CO_2 menggunakan NaOH dan Ca(OH)_2

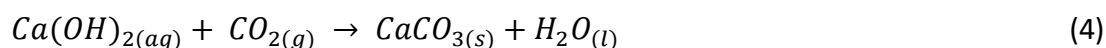
Dalam upaya memanfaatkan gas CO_2 yang dihasilkan dari proses pirolisis tongkol jagung, perlu diperhatikan pula integrasi teknologi penangkapan karbon ke dalam sistem tersebut. Salah satu metode penangkapan CO_2 yang umum diterapkan adalah melalui proses absorpsi menggunakan larutan natrium hidroksida. NaOH dipilih sebagai larutan penyerap karena memiliki laju reaksi yang cepat, kapasitas penyerapan yang tinggi, ketersediaan yang melimpah, serta biaya yang relatif rendah. Selain efektif dalam menurunkan emisi CO_2 , proses ini juga menghasilkan senyawa natrium karbonat (Na_2CO_3) sebagai produk samping yang memiliki potensi nilai ekonomi [39].

Kemampuan NaOH dalam menyerap CO_2 dan menghasilkan Na_2CO_3 dipengaruhi oleh konsentrasi dan pH larutan, yang menentukan waktu serta hasil reaksi. Reaksi antara NaOH dan CO_2 dapat membentuk NaHCO_3 atau Na_2CO_3 , namun pada kondisi pH dan konsentrasi yang tepat terutama jika NaOH berlebih produk dominan yang dihasilkan adalah Na_2CO_3 . Reaksi antara NaOH dan CO_2 dapat dituliskan sebagai berikut.

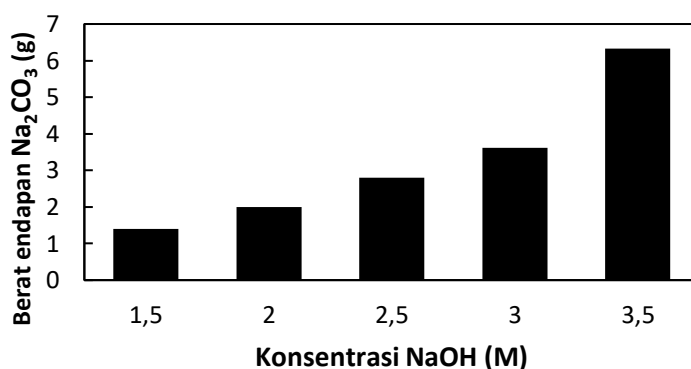


Persamaan (1) menunjukkan bahwa konsentrasi NaOH berlebih akan menghasilkan natrium karbonat Na_2CO_3 . Pada Persamaan (2), saat konsentrasi NaOH menurun namun CO_2 masih tersedia, terbentuk natrium bikarbonat NaHCO_3 . Secara keseluruhan, Persamaan (3) menjelaskan bahwa pada kondisi molar yang setara antara NaOH dan CO_2 , produk utama adalah NaHCO_3 bukan Na_2CO_3 . Oleh karena itu, pemilihan konsentrasi NaOH yang tepat sangat penting dalam proses penyerapan CO_2 .

Selain NaOH , larutan Ca(OH)_2 juga merupakan penyerap CO_2 yang efektif karena mampu bereaksi langsung dengan gas CO_2 dan membentuk endapan CaCO_3 yang stabil. Ca(OH)_2 mudah ditemukan, harganya relatif terjangkau, dan tidak bersifat sangat korosif seperti NaOH , sehingga lebih aman digunakan. Produk akhirnya, yaitu kalsium karbonat (CaCO_3), juga bernilai ekonomis karena dapat dimanfaatkan dalam berbagai industri, seperti bahan baku semen, pengisi (filler) dalam plastik, dan industri kertas. Reaksi antara Ca(OH)_2 dan CO_2 dapat dituliskan sebagai berikut.



Penelitian oleh N. Savitri (2020) mengkaji penyerapan gas CO_2 yang berasal dari emisi sepeda motor menggunakan larutan NaOH sebagai penyerap, dengan memvariasikan konsentrasi larutan dan waktu kontak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi NaOH sebesar 3,5 M menghasilkan endapan natrium karbonat (Na_2CO_3) terbanyak, yaitu sebesar 6,325 gram dapat dilihat pada Gambar 2. Sementara itu, waktu penyerapan selama 2,5 jam menghasilkan endapan tertinggi sebesar 6,525 gram. Endapan yang terbentuk kemudian dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan menunjukkan struktur kristal berjenis monoklinik. Hasil analisis FTIR mengidentifikasi adanya gugus fungsi OH, C=O, CO_3^{2-} , dan C–O yang berikatan dengan unsur natrium (Na) dan karbon (C) [40].

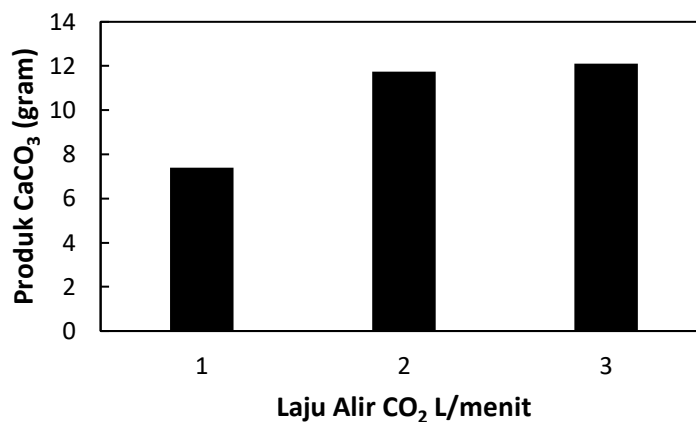


Gambar 2. Pengaruh konsentrasi NaOH terhadap berat endapan Na_2CO_3 pada kendaraan bermotor [40]

Penelitian yang dilakukan oleh B. L. Wicahyono (2017) berfokus pada proses pemurnian biogas dengan menyerap gas CO_2 dari campuran gas metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2) yang memiliki rasio 50:50. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi efektivitas penyerapan CO_2 menggunakan dua jenis larutan penyerap, yaitu NaOH dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dengan memvariasikan fraksi volume dan waktu kontak. Hasil menunjukkan bahwa variasi waktu kontak tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap efisiensi penyerapan CO_2 . Namun, perbandingan antara kedua larutan menunjukkan bahwa larutan NaOH memiliki efisiensi penyerapan tertinggi sebesar 91,288% pada fraksi volume 50%. Sementara itu, larutan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ menunjukkan efisiensi tertinggi sebesar 68,108% pada fraksi volume 0,07% [8].

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Nuyoto, dkk. (2021), pada Gambar 3 menunjukkan peningkatan laju alir gas CO_2 memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap jumlah produk kalsium karbonat (CaCO_3) yang terbentuk. Hal ini disebabkan oleh semakin besarnya jumlah reaktan CO_2 yang masuk ke dalam sistem, yang mendorong peningkatan laju difusi gas CO_2 ke dalam fase cair [41]. Akibatnya, intensitas kontak antara reaktan CO_2 dan larutan penyerap $\text{Ca}(\text{OH})_2$ menjadi lebih tinggi. Berdasarkan mekanisme reaksi, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mengalami ionisasi menghasilkan ion Ca^{2+} dan OH^- , sehingga dengan semakin banyaknya CO_2 yang tersedia, peluang terjadinya reaksi pembentukan CaCO_3 dan H_2O juga meningkat [37]. Namun demikian, menurut O. A. Jimoh, dkk. (2017) peningkatan laju alir gas CO_2 dari 2 menjadi 3 L/min diduga telah mendekati kondisi laju reaksi

maksimum, sehingga penambahan lebih lanjut tidak lagi menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap jumlah produk yang dihasilkan [42].



Gambar 3. Pengaruh laju alir gas CO₂ terhadap padatan CaCO₃ yang terbentuk [41]

Pada penelitian R. Sutanto,dkk (2019) menunjukkan perbandingan laju alir biogas terhadap CO₂ yang terserap dan Rasio Ca(OH)₂. Penyerapan CO₂ pada dilakukan pada kondisi operasi pada suhu 60°C, konsentrasi larutan Ca(OH)₂ yaitu 30,6 gram/10 liter air, ketinggian larutan Ca(OH)₂ 50 cm, dan laju alir larutan Ca(OH)₂ 200 ml/ menit. Peningkatan laju alir biogas menyebabkan penurunan efisiensi penyerapan CO₂. Hal ini disebabkan oleh tingginya kandungan metana dalam biogas yang bersifat inert dan membatasi ruang reaksi bagi CO₂ dalam larutan Ca(OH)₂. Penyerapan CO₂ optimal terjadi saat rasio molar Ca(OH)₂ terhadap CO₂ lebih dari satu, seperti pada laju alir 0,5 LPM dengan rasio 1,15 dan efisiensi penyerapan 69,351%. Namun, peningkatan laju alir gas mempercepat kejenuhan larutan absorben dan penurunan pH, sehingga menghambat pembentukan CaCO₃ dan menurunkan konversi. Oleh karena itu, untuk efisiensi optimal, disarankan menggunakan absorben dengan konsentrasi rendah, laju alir absorben tinggi, dan laju alir gas rendah [43].

Tabel 3. Pengaruh laju alir biogas terhadap penyerapan CO₂ dan rasio mol Ca(OH)₂[43]

Laju Alir (liter/min)	% CO ₂ yang terserap	Rasio Ca(OH) ₂ /CO ₂ (mol/mol)
0.5	69,351	1,150
0,6	68,744	0,959
0,7	68,358	0,822
0,8	68,210	0,719
0,9	67,436	0,639

Penelitian yang dilakukan oleh Tyas A. R dan Putri A. D. R. (2024) membahas hubungan antara pH dan waktu kontak dalam proses penyerapan gas CO₂ menggunakan larutan Ca(OH)₂. Gas CO₂ diperoleh dari biogas limbah sayuran yang dialirkan menggunakan blower ke dalam larutan penyerap. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan konsentrasi Ca(OH)₂ selama proses absorpsi sebanding dengan penurunan pH larutan. Semakin lama waktu kontak, sifat basa larutan semakin berkurang sehingga pH cenderung turun mendekati netral. pH awal larutan sebesar 12,53, dan setelah proses absorpsi selama 15,

30, dan 60 menit, pH turun menjadi 12,44; 12,37; dan 12,26. Penurunan ini masih tergolong kecil karena waktu tinggal gas yang relatif singkat, sehingga hanya sebagian kecil CO₂ yang bereaksi dengan larutan [44].

Berdasarkan studi penelitian sebelumnya, terlihat bahwa penurunan pH larutan Ca(OH)₂ seiring bertambahnya waktu kontak gas CO₂ menunjukkan bahwa proses penyerapan telah terjadi. Hal ini dapat menjadi indikator penting dalam eksperimen, yaitu perubahan pH dapat digunakan sebagai parameter kualitatif terjadinya reaksi antara CO₂ dan absorben. Selain itu, untuk mengetahui kuantitas CO₂ yang terserap, dapat dilakukan pengukuran konsentrasi absorben sebelum dan sesudah proses absorpsi, yaitu dengan titrasi atau gravimetri. Pemilihan rasio antara absorben dan biomassa menjadi salah satu variabel penting yang mempengaruhi efisiensi penyerapan. Rasio ini perlu dihitung berdasarkan kandungan CO₂ yang dihasilkan dari pirolisis tongkol jagung, menggunakan pendekatan stoikiometri reaksi dan hasil studi literatur terkait komposisi gas pirolisis.

Sistem penyerapan yang digunakan pada studi sebelumnya, gas CO₂ dialirkan ke dalam larutan penyerap menggunakan blower dan dilewatkan dalam bentuk gelembung untuk meningkatkan kontak antara gas dan larutan. Prinsip ini akan diadopsi dalam rencana eksperimen, namun dengan menggunakan gas nitrogen sebagai gas pembawa. Penggunaan nitrogen bertujuan tidak hanya untuk mendorong aliran gas CO₂, tetapi juga untuk menghilangkan O₂ selama proses pirolisis.

Dengan mempertimbangkan parameter-parameter tersebut, maka rencana penelitian yang akan dilakukan berfokus pada penentuan rasio optimum absorben terhadap biomassa, volume massa absorben, konsentrasi larutan absorben, dan indikator keberhasilan penyerapan melalui pengamatan pH dan analisis produk. Studi ini memberikan dasar dalam perencanaan eksperimen selanjutnya, yaitu pemilihan metode penyerapan dan parameter operasi penyerapan CO₂ dari hasil pirolisis tongkol jagung.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil studi literatur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa limbah tongkol jagung memiliki potensi besar sebagai bahan baku pirolisis untuk menghasilkan gas pirolisat yang mengandung karbon dioksida (CO₂). Kandungan karbon yang tinggi serta ketersediaannya yang melimpah menjadikan tongkol jagung biomassa yang layak untuk dimanfaatkan secara berkelanjutan. Proses pirolisis menghasilkan gas buang CO₂ yang dapat ditangkap melalui metode absorpsi kimia menggunakan larutan basa NaOH dan Ca(OH)₂. Hasil reaksi antara CO₂ dan kedua larutan ini menghasilkan senyawa karbonat bernilai ekonomi yaitu natrium karbonat (Na₂CO₃) dan kalsium karbonat (CaCO₃). Efisiensi penyerapan dipengaruhi oleh variabel jenis absorben, konsentrasi larutan, waktu kontak, pH, laju alir, dan rasio mol antara absorben dan CO₂.

Berdasarkan hasil studi ini, rencana proposal penelitian ini akan mempelajari secara eksperimental penyerapan CO₂ dari gas hasil pirolisis tongkol jagung. Perangkat peralatan yang digunakan terdiri dari reaktor pirolisis, tangki gas nitrogen, tangki absorber. Sebagai absorben CO₂ adalah larutan NaOH dan Ca(OH)₂ yang dimasukkan kedalam tangki absorber (*bubble coloumn*). Indikator untuk mengetahui telah terjadi reaksi dan pengukuran CO₂ terserap dengan cara mengukur pH, titrasi larutan absorben dan gravimetri. Perhitungan CO₂ terserap didasarkan persamaan reaksi stokiometri (pers. 1 dan 4)

REFERENSI

- [1] B. P. Statistik, "Luas Panen, Produksi, dan Produktivitas Jagung Menurut Provinsi," 2024.
- [2] Meilianti, "Pembuatan Karbon Aktif dari Arang Tongkol Jagung dengan Variasi Konsentrasi Aktivator Natrium Karbonat (Na_2CO_3)," *Distilasi*, vol. 5, no. 1, hal. 14–20, 2020.
- [3] K. Ridhuan dan J. Suranto, "Perbandingan Pembakaran Pirolisis Dan Karbonisasi Pada Biomassa Kulit Durian Terhadap Nilai Kalori," *Journal Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Metro*, vol. 5, no. 1, hal. 50–56, 2017.
- [4] W. Wijayanti, M. N. Sasongko, C. Meidiana, dan L. Yuliati, "Metode Pirolisis Untuk Penanganan Sampah Perkotaan Sebagai Penghasil Bahan Bakar Alternatif," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 4, no. 2, hal. 85–92, 2013.
- [5] Q. Cao, K. C. Xie, W. R. Bao, dan S. G. Shen, "Pyrolytic Behavior of Waste Corn Cob," *Bioresource Technology*, vol. 94, no. 1, hal. 83–89, 2004.
- [6] A. Budianto, "Pirolisis Botol Plastik Bekas Minuman Air Mineral Jenis Pet Menjadi Fuel," in *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan V*, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, 2017, hal. 201–206.
- [7] P. A. R. Wijaya dan R. P. Wardani, "Pengurangan CO_2 Dalam Biogas Menggunakan Kolom Gelembung $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Secara Kontinyu," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.
- [8] B. L. Wicahyono, "Perbandingan Kinerja Purifikasi Biogas Menggunakan NaOH dan CaOH Disekitar Titik Jenuh," Universitas Brawijaya, Malang, 2017.
- [9] E. Purba, C. N. Yogita, dan P. D. R. Sari, "Biogas Purification by CO_2 Reduction in Bubble Column Using $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and NaOH," in *Proceeding of the International Conference on Sustainable Biomass*, Bandar Lampung: Atlantis Press, 2021, hal. 153–157.
- [10] F. Hasan dan A. Pratiwi, "Praperancangan Pabrik Natriumkarbonat Menggunakan Metode Solvay Kapasitas 300.000 Ton/Tahun," Politeknik Negeri Ujung Pandang, 2024.
- [11] B. P. Statistik, "Volume Produksi Pertambangan Bahan Galian (M^3)," 2023.
- [12] M. Syahrir dan M. Mahyati, "Pengolahan Limbah Tongkol Jagung Menjadi Asap Cair dengan Metode Pirolisis Lambat," *INTEK: Jurnal Penelitian*, vol. 6, no. 1, hal. 69–74, 2019.
- [13] S. A. Novita, S. Santosa, N. Nofialdi, A. Andasuryani, dan A. Fudholi, "Artikel Review: Parameter Operasional Pirolisis Biomassa," *Agroteknika*, vol. 4, no. 1, hal. 53–67, 2021.
- [14] A. Andini, Arfiana, E. R. Finalis, Fausiah, E. W. Tjahjono, M. Saleh, Iman, B. A. Firmandoko, D. B. I. Nuswantoro, E. F. Destian, H. Bangun, H. Sutriyanto, dan P. Rousset, "A Parametric Study of Torrefaction Technology of Agricultural Residues in Indonesia," *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri*, vol. 17, no. 2, hal. 47–54, 2022.
- [15] A. Shariff, M. N. Noor, A. Lau, dan M. A. M. A. Ali, "A Comparative Study on Biochar from Slow Pyrolysis of Corn Cob and Cassava Wastes," *International Journal of Biological, Life, and Agricultural Sciences*, vol. 10, no. 12, hal. 767–771, 2016.
- [16] A. Shariff, N. Syairah, M. Aziz, N. I. Ismail, dan N. Abdullah, "Corn Cob as a Potential Feedstock for Slow Pyrolysis of Biomass," *Journal of Physical Science*, vol. 27, no. 2, hal. 123–137, 2016.
- [17] A. I. Anukam, B. P. Goso, O. O. Okoh, dan S. N. Mamphweli, "Studies on Characterization

- of Corn Cob for Application in a Gasification Process for Energy Production,” *Journal of Chemistry*, vol. 2017, hal. 1–9, 2017.
- [18] A. Gani, M. Rozan, D. Arkan, M. Reza, dan H. Desvita, “Case Studies in Chemical and Environmental Engineering Proximate and Ultimate Analysis of Corncob Biomass Waste as Raw Material for Biocoke Fuel Production,” *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 8, hal. 1–8, 2023.
- [19] C. A. Mbodji, D. Diouf, B. Piriou, dan A. Maïga, “Pelleting of Agricultural Residues in Senegal: Study of Influencing Phenomena & Chemical Elements,” *Journal of Heat and Mass Transfer Research*, vol. 10, no. 2, hal. 191–196, 2023.
- [20] D. Q. Viet, N. Van Vinh, P. H. Luong, dan V. D. S. Tho, “Termogravimetric Study on Rice, Corn, and Sugar Cane Crop Residue,” *Journal of Sustainable Energy & Environment*, vol. 6, hal. 87–91, 2015.
- [21] E. Biagini, F. Barontini, dan L. Tognotti, “Gasification of Agricultural Residues in a Demonstrative Plant: Corn Cobs,” *Bioresource Technology*, vol. 173, hal. 110–116, 2015.
- [22] J. J. Lu dan W. S. Chen, “Product Yields and Characteristics of Corncob Waste under Various Torrefaction Atmospheres,” *Energies*, vol. 7, hal. 13–27, 2014.
- [23] M. Ceranic, T. Kosanic, D. Duranovic, Z. Kaluderovic, S. Duric, P. Gojkovic, dan R. Bozickovic, “Experimental Investigation of Corn Cob Pyrolysis,” *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 8, no. 6, 2016.
- [24] M. Klaas, C. Greenhalf, M. Ouadi, H. Jahangiri, A. Hornung, C. Briens, dan F. Berruti, “The Effect of Torrefaction Pre-Treatment On The Pyrolysis of Corn Cobs,” *Results in Engineering*, vol. 7, hal. 1–7, 2020.
- [25] M. Drane, M. Zbair, S. Hajjar-Garreau, L. Josien, L. Michelin, S. Bennici, dan L. Limousy, “Unveiling the Potential of Corn Cob Biochar: Analysis of Microstructure and Composition with Emphasis on Interaction with NO₂,” *Materials*, vol. 17, no. 1, hal. 1–25, 2024.
- [26] M. T. Abatyough, V. O. Ajibola, E. B. Agbaji, dan Z. I. Yashim, “Properties of Upgraded Bio-oil from Pyrolysis of Waste Corn Cobs,” *Journal of Sustainability and Environmental Management*, vol. 1, no. 2, hal. 120–128, 2022.
- [27] M. Ephantus, K. Robert, Y. Nemoto, dan N. Paul, “Energy Content Estimation in Waste Saw Dust, Maize Cobs and Rice Husks Using Multiple Regression Analysis,” *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 5, no. 4, hal. 1501–1505, 2016.
- [28] M. Danish, M. Naqvi, U. Farooq, dan S. Naqvi, “Characterization of South Asian Agricultural Residues for Potential Utilization in Future ‘energy mix,’” *Energy Procedia*, vol. 75, hal. 2974–2980, 2015.
- [29] M. A. Sulaiman, B. O. Adetifa, S. O. Adekomaya, N. S. Lawal, dan O. O. Adama, “Experimental Characterization of Maize Cob and Stalk Based Pellets for Energy Use,” *Engineering Journal*, vol. 23, no. 6, hal. 117–128, 2019.
- [30] N. Kaliyan dan R. V. Morey, “Densification Characteristics of Corn Cobs,” *Fuel Processing Technology*, vol. 91, no. 5, hal. 559–565, 2010.
- [31] M. M. Pedroza, P. R. S. Machado, J. G. D. Silva, M. G. Arruda, dan A. P. Pinanco, “Product and Application of Activated Carbon Obtained from the Thermodynamical Degradation of Corn Cob,” *Journal Of Applied Research*, vol. 22, no. 2, hal. 258–265, 2025.
- [32] R. A. Canales-Flores, F. Prieto-García, J. Prieto-Méndez, O. A. Acevedo-Sandoval, dan E.

- M. Otazo-Sánchez, "Evaluation of Three Lignocellulose Biomass Materials (Barley Husk, Corn Cobs, Agave Leaves) As Precursors of Activated Carbon," *Revista de la Facultad de Ciencias*, vol. 11, no. 1, hal. 17–39, 2022.
- [33] R. Paulauskas, M. Praspaliauskas, I. Ambrazevičius, K. Zakarauskas, E. Lemanas, J. Eimontas, dan N. Striugas, "Performance of Corn Cob Combustion in a Low-Temperature Fluidized Bed," *Energies*, vol. 17, no. 9, 2024.
- [34] S. Kanwal, S. Munir, N. Chaudhry, dan H. Sana, "Physicochemical Characterization of Thar Coal and Torrefied Corn Cob," *Energy Exploration and Exploitation*, vol. 37, no. 4, hal. 1286–1305, 2019.
- [35] X. Yao dan K. Xu, "Comparative Study of Characterization and Utilization of Corncob Ashes from Gasification Process and Combustion Process," *Construction and Building Materials*, vol. 119, hal. 215–222, 2016.
- [36] X. Liu, Y. Zhang, Z. Li, R. Feng, dan Y. Zhang, "Characterization of Corncob-Derived Biochar and Pyrolysis Kinetics in Comparison with Corn Stalk and Sawdust," *Bioresource Technology*, vol. 170, hal. 76–82, 2014.
- [37] V. Chintala, S. Kumar, J. K. Pandey, A. K. Sharma, dan S. Kumar, "Solar Thermal Pyrolysis of Non-Edible Seeds to Biofuels and Their Feasibility Assessment," *Energy Conversion and Management*, vol. 153, hal. 482–492, 2017.
- [38] B. Sudarmanta dan A. Adrieq, "Studi Eksperimental Pengaruh Air Fuel Ratio Proses Gasifikasi Briket Municipa Solid Waste Terhadap Unjuk Kerja Gasifier Tipe Downdraft," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 1, no. 1, hal. 1–6, 2016.
- [39] B. R. Arifin, N. Hidayati, dan D. N. Widagdo, "Pengaruh Temperatur Larutan NaOH pada Pemanfaatan CO₂ Flue Gas Boiler pada Proses Sintesis Natrium Karbonat Menggunakan NaOH," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin*, Jakarta: Politeknik Negeri Jakarta, 2022, hal. 1093–1101.
- [40] N. Savitri, "Penjerapan Gas Buang Karbon Dioksida (CO₂) Pada Kendaraan Bermotor Menggunakan Larutan Penjerap Natrium Hidroksida (NaOH)," Universitas Islam Indonesia, 2020.
- [41] Nuyoto, N. Mas'ulunniah, A. S. Choerunnisa, dan Suripno, "Pemanfaatan Karbon Dioksida untuk Sintesis Precipitated Calcium Carbonate (PCC) dengan Metode Karbonasi," *Jurnal Integrasi Proses*, vol. 10, no. 2, hal. 90–95, 2021.
- [42] O. A. Jimoh, T. A. Otitoju, H. Hussin, K. S. Ariffin, dan N. Baharun, "Understanding the Precipitated Calcium Carbonate (PCC) Production Mechanism and Its Characteristics in the Liquid-Gas System Using Milk of Lime (MOL) Suspension," *South African Journal of Chemistry*, vol. 70, hal. 1–7, 2017.
- [43] R. Sutanto, A. Mulyanto, M. Wirawan, I. B. Alit, dan N. Nurchayati, "Adsorpsi Gas Karbon Dioksida dalam Biogas dengan Menggunakan Endapan Batu Kapur," *Dinamika Teknik Mesin*, vol. 9, no. 2, hal. 133, 2019.
- [44] T. A. R dan Putri A. D. R., "Precipitated Calcium Carbonate (PCC) dari Karbon Dioksida (CO₂) Hasil Proses Bio-Drying dengan Metode Karbonasi," *Jurusan Teknik Kimia*, 2024.