

Analisis Pengaruh Asam Organik dari Cangkang Kelapa dengan Metode Pirolisis Terhadap Proses Reduksi Scale di Industri Minyak

Aninda Arik Tanza Putri, Anerasari Meidinariasry, Linda Ekawati

Jurusan Teknik Kimia, Program Studi Teknologi Kimia Industri, Politeknik Negeri Sriwijaya Palembang, Indonesia

*Koresponden email: anindaaarktanza@gmail.com

Diterima: 4 Desember 2025

Disetujui: 09 Desember 2025

Abstract

Scale problems in the oil industry have become a serious challenge because they can clog piping systems and reduce operational efficiency. This study aims to evaluate the effectiveness of organic acids from coconut shell pyrolysis as an environmentally friendly scale reducer and compare it with HCl solutions at various concentrations. Pyrolysis was carried out at a temperature of 500°C for 30 minutes to produce bio-oil rich in phenolic compounds and organic acids. Characterization using GC-MS showed the dominance of phenol compounds, 2-methoxy phenol, and 2,6-dimethoxy phenol which play an active role in the reduction process. Reduction tests were carried out on Fe₂O₃, Fe₃O₄, and FeSO₄-based scales with time variations of 5-40 minutes, and 5-30% HCl as a comparison. The results showed that organic acid was able to reduce scale by up to 36.03% in 40 minutes, equivalent to 15% HCl (37.85% at 20 minutes) and 25% HCl (37.45% at 10 minutes). The optimum effectiveness of organic acid occurred at 30.04% at the 25th minute. Although HCl showed a higher reduction capacity, organic acid was considered safer for the environment and metal infrastructure. This study indicates that bio-oil from coconut shell pyrolysis has potential as a sustainable alternative for scale reduction.

Keywords: *pyrolysis, organic acid, coconut shell, scale, reduction*

Abstrak

Permasalahan scale dalam industri minyak telah menjadi tantangan serius karena dapat menyumbat sistem perpipaan dan menurunkan efisiensi operasional. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas asam organik hasil pirolisis cangkang kelapa sebagai pereduksi skala ramah lingkungan serta membandingkannya dengan larutan HCl pada berbagai konsentrasi. Pirolisis dilakukan pada suhu 500 °C selama 30 menit untuk menghasilkan bio-oil yang kaya senyawa fenolik dan asam organik. Karakterisasi menggunakan GC-MS menunjukkan dominasi senyawa fenol, fenol 2-metoksi, dan fenol 2,6-dimetoksi yang berperan aktif dalam proses reduksi. Uji reduksi dilakukan terhadap scale berbasis Fe₂O₃, Fe₃O₄, dan FeSO₄ dengan variasi waktu 5-40 menit, dan HCl 5-30% sebagai pembanding. Hasil menunjukkan bahwa asam organik mampu mereduksi scale hingga 36,03% dalam 40 menit, setara dengan HCl 15% (37,85% pada 20 menit) dan HCl 25% (37,45% pada 10 menit). Efektivitas optimum pada asam organik terjadi di menit ke-25 sebesar 30,04%. Meskipun HCl menunjukkan kemampuan reduksi lebih tinggi, asam organik dinilai lebih aman terhadap lingkungan dan infrastruktur logam. Penelitian ini mengindikasikan bahwa bio-oil hasil pirolisis cangkang kelapa memiliki potensi sebagai alternatif pereduksi scale yang berkelanjutan.

Kata Kunci: *pirolisis, asam organik, cangkang kelapa, scale, reduksi*

1. Pendahuluan

Permasalahan *scale* dalam industri minyak telah menjadi tantangan sejak akhir abad ke-19 karena menyebabkan penyumbatan pipa, penurunan laju alir, dan peningkatan biaya perawatan [1]. *Scale* terbentuk akibat perubahan tekanan dan temperatur yang memicu pengendapan mineral seperti kalsium karbonat, barium sulfat, dan kalsium sulfat [2].

Cangkang kelapa mengandung lignin, selulosa, dan hemiselulosa yang dapat dikonversi menjadi asam organik melalui pirolisis, yaitu proses dekomposisi termal tanpa oksigen [3]. Asam organik yang dihasilkan mengandung gugus karboksil dan fenol, yang memberikan sifat keasaman [4]. Berdasarkan penelitian [5][6] menyatakan bahwa kadar asam organik dari cangkang kelapa lebih tinggi dibandingkan dengan cangkang kelapa sawit yang dapat di lihat pada **Tabel 1**.

Proses pirolisis cangkang kelapa ini melibatkan pemanasan biomassa pada suhu 300–600°C dalam kondisi tanpa oksigen, menghasilkan fraksi gas, cair (*bio-oil*), dan padat (*char*). Yield *bio-oil* tertinggi diperoleh pada suhu 500–600°C [7]. Penelitian [8] mengatakan bahwa rendemen *bio-oil* sebesar 45,75%

pada suhu 450°C selama 100 menit, lebih tinggi dibandingkan cangkang kelapa sawit yang hanya menghasilkan 28% pada 400°C selama 90 menit [6].

Tabel 1. Komposisi asam organik dari cangkang kelapa sawit dan cangkang kelapa

Cangkang kelapa sawit		Cangkang kelapa	
Komponen	Kadar (%)	Komponen	Kadar (%)
Asam fromiat	7,16	Fenol	19,02
Asam Karbamat	4,92	4-Metilfenol	4,24
Fenol	4,44	2-Metilfenol	6,19
Asam Asetat	1,16	2-Metoksi-4-Metil-Fenol	2,25
2-Metoksi-6-Metilfenol	2,16	4-Etil-2-Metoksifenol	2,37
2-Cyclopenten-1, 2-hidroksi-3-metil	1	5Aketoksimetil-2-furaldehyde	1,42
		2,6 Dimentoksi-Fenol	4,97
Total	20,84		40,46

Ini menunjukkan bahwa pirolisis cangkang kelapa pada 500°C selama 30 menit dapat menghasilkan rendemen *bio-oil* hingga 49,45%, dengan kandungan asam organik mencapai 40,46%. Asam organik ini efektif digunakan sebagai pereduksi *scale* dalam industri minyak, mampu melarutkan endapan seperti CaCO₃ dan BaSO₄, serta memiliki risiko korosi yang lebih rendah dibandingkan HCl [9]. Selain itu, pemanfaatan asam organik dari biomassa mendukung prinsip keberlanjutan dan mengurangi ketergantungan pada bahan kimia sintetis [10]. Proses pereduksi bertujuan menghilangkan endapan mineral yang terbentuk akibat perubahan kondisi fisik-kimia, seperti tekanan, suhu, atau pH, yang dapat menghambat aliran fluida dan merusak peralatan [11]. [5] telah melakukan uji pereduksi *scale* menggunakan asam organik dari cangkang kelapa sawit pada variasi waktu 5-20 menit dengan hasil yang dikaji dalam **Tabel 2**.

Tabel 2. Kemampuan reduksi menggunakan pereduksi asam organik dari cangkang kelapa sawit

Waktu pereduksi (menit)	Berat tereduksi (gr)	Persentase tereduksi (%)
5	0,692	13,837
10	0,874	12,477
15	1,044	20,876
20	1,123	22,456

Kemampuan mereduksi *scale* pada menit ke 20 menggunakan pereduksi asam organik cangkang kelapa sawit setara dengan kemampuan mereduksi *scale* menggunakan HCl 5%. Maka dari uraian di atas, penelitian kali ini 4 menggunakan variasi waktu 5-40 menit dan jenis pembanding yang sama yaitu HCl 5-30%. Proses mereduksi *scale* pada penelitian kali ini menggunakan asam organik cangkang kelapa yang memiliki kandungan asam organik dengan kadar yang lebih tinggi dibandingkan dengan asam organik berbahan dasar cangkang kelapa sawit, serta menginovasikan pereduksi organik yang ramah lingkungan sehingga dapat mengurangi penggunaan bahan kimia dan biaya operasi.

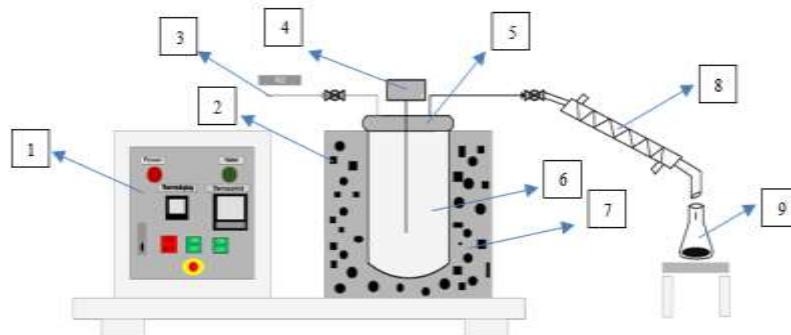
2. Metode Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi palu, seperangkat alat pirolisis, pH meter, gelas ukur, *beaker glass*, neraca analitik, oven, alumunium foil, GC-MS, XRF. Bahan yang digunakan yaitu cangkang kelapa, *scale*, dan HCl Konsentrasi 5, 10, 15, 20, 25, 30 % p.a. Merck. Penelitian ini terdiri dari lima tahap yaitu persiapan bahan baku cangkang kelapa dan sampel scaale, Pirolisis, pengujian pH, reduksi *scale* menggunakan asam organik dan blanko, pengujian gravimetri. Variasi percobaan dilakukan terhadap proses reduksi *scale* dengan variasi waktu reduksi 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, dan 45 menit dan konsentrasi blanko HCl pada variasi konsentrasi 5, 10, 15, 20, 25, dan 30%.

Proses preparasi sampel *scale* dengan cara memperkecil ukuran *scale* hingga kurang lebih 5 gr untuk mempermudah proses reduksi, kemudian cangkang kelapa yang digunakan sebagai bahan baku terlebih dahulu dikeringkan menggunakan sinar matahari hingga kadar airnya berkurang. Setelah kering, dilakukan proses pensortiran untuk memisahkan kotoran dan sabut kelapa yang masih menempel pada permukaan cangkang. Cangkang yang telah bersih kemudian dipecahkan menjadi potongan-potongan kecil agar

memudahkan proses selanjutnya. Potongan cangkang kelapa inilah yang kemudian digunakan sebagai bahan baku utama dalam proses pirolisis.

Cangkang kelapa dipecahkan menjadi bagian-bagian kecil agar luas permukaannya meningkat dan proses pemanasan lebih merata. Sebanyak 750 gram cangkang kelapa kemudian ditimbang dan dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis. Proses pirolisis dilakukan pada suhu 500 °C selama 30 menit hingga terbentuk produk cair berupa bio-oil cangkang kelapa. Hasil bio-oil yang diperoleh kemudian diuji menggunakan GC-MS untuk mengetahui komposisi senyawanya, serta dilakukan pengujian pH untuk menentukan tingkat keasamannya. Skema alat pirolisis yang digunakan pada saat penelitian dapat dilihat pada **Gambar 1** sebagai berikut:



Gambar 1. Skema alat pirolisis

Keterangan :

- | | |
|---------------------|-----------------|
| 1. Kontrol panel | 6. Reaktor |
| 2. Batu Tahan Panas | 7. Furnace |
| 3. Aliran Nitrogen | 8. Kondensor |
| 4. Sensor Pressure | 9. Beaker glass |
| 5. Penutup Reaktor | |

Proses reduksi scale dilakukan menggunakan asam organik hasil pirolisis cangkang kelapa dan larutan HCl sebagai blanko dengan variasi konsentrasi 5, 10, 15, 20, 25, dan 30%. Masing-masing larutan pereduksi disiapkan sebanyak 25 mL. Sebanyak ±5 gram scale kemudian direndam dalam larutan tersebut dan didiamkan pada suhu ruang dengan variasi waktu 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 dan 45 menit untuk mengetahui pengaruh lama perendaman terhadap proses reduksi. Setelah perendaman selesai, larutan dan scale yang tereduksi dipisahkan, lalu scale dikeringkan menggunakan oven pada suhu 180 °C hingga mencapai berat stabil. Setelah itu, scale dilakukan uji gravimetri dengan cara ditimbang kembali untuk memperoleh persentase reduksi berdasarkan selisih massa sebelum dan sesudah perlakuan.

3. Hasil dan Pembahasan

Proses pirolisis cangkang kelapa pada suhu 500 °C selama 30 menit bertujuan mendekomposisi senyawa kompleks menjadi senyawa ringan seperti asam organik, fenol, dan senyawa volatil [8]. Rendemen bio-oil sebesar 44% menunjukkan efisiensi konversi yang cukup optimal, dipengaruhi oleh tingginya kandungan lignin dalam cangkang kelapa yang menghasilkan fraksi volatil aromatik dan asam [12]. Suhu 500 °C dipilih karena merupakan titik optimal dekomposisi lignoselulosa: hemiselulosa terurai pada 200–300 °C menghasilkan asam asetat dan furfural, selulosa pada 300–400 °C menghasilkan levoglukosan dan senyawa karbonil, sedangkan lignin terurai pada 250–500 °C membentuk senyawa fenolik melalui pemutusan ikatan β-O-4 dan C-C. Hasil ini sejalan dengan penelitian [13] yang menyatakan bahwa lignin menghasilkan bio-oil kaya fenol dan senyawa aromatik pada suhu 400–600 °C.

3.1 Komponen Bio-oil

Hasil analisis GC-MS terhadap asam organik dari pirolisis cangkang kelapa menunjukkan keberagaman senyawa kimia, yang didominasi oleh senyawa fenolik dan asam lemah yang dapat dilihat pada **Tabel 3**. Senyawa dengan area terbesar adalah fenol (27,01%), diikuti 2-metoksfenol (13,95%), dan fenol 2,6-dimetoksi (10,05%). Senyawa ini merupakan hasil degradasi struktur lignin, terutama subunit guaiacyl dan syringyl, yang terfragmentasi pada suhu 400–600 °C selama pirolisis [14]. Kandungan fenol dan turunannya yang mencapai lebih dari 60% menunjukkan bahwa lignin berperan besar dalam pembentukan senyawa volatil aromatik dalam bio-oil [15].

Tabel 3. Komponen *Bio-oil*

Area %	Komponen
1.32	Asam propanoat
10.22	3-Furfuraldehida
1.06	2-Furanol, tetrahidro-2-metil
1.00	2-Propanon, 1-(asetiloksi)
27.01	Fenol
4.03	Furan, 2,5-dietoksitetrahidro
2.13	2-Siklopenten-1-on, 2-hidroksi-3-metil
2.67	Fenol, 3-metil
13.95	Fenol, 2-metoksi
1.58	2-Pantanon, 5,5-dietoksi
3.40	Kreosol
3.38	Fenol, 4-etil-2-metoksi
10.05	Fenol, 2,6-dimetoksi
2.08	Pentil filisinat
3.16	Fenol, 4-metoksi-3-(metoksimetil)
1.25	5-tert-Butilpirogallol
1.19	Sikloheksanakarboksyaldehida, 6-metil-3-(1 metiletil)-2-okso-1-(3-oksobutil)
2.27	Turunan asam propanoat trisiklis

Selain senyawa fenolik, terdeteksi juga senyawa asam kuat seperti asam propanoat (1,32%) dan turunan asam propanoat trisiklis (gabungan ±2,27%) yang terbentuk dari pemecahan gugus karboksilat dan struktur siklik akibat pemanasan termal [16]. Senyawa-senyawa ini memberikan kontribusi terhadap pH rendah pada *bio-oil* (±2), yang mencerminkan sifat keasamannya. Senyawa volatil lainnya seperti furfuraldehida (10,22%) dan senyawa turunannya berasal dari degradasi hemiselulosa dan selulosa, serta menunjukkan karakteristik polar yang penting dalam proses kimia lanjutan [17].

3.2 Karakteristik *Scale*

Analisis X-Ray Fluorescence (XRF) terhadap sampel *scale* menunjukkan bahwa unsur dominan yang terkandung adalah Fe (besi) sebesar 92,592%. Besi tersebut umumnya berada dalam bentuk oksida seperti Fe_2O_3 (hematit) dan Fe_3O_4 (magnetit). Selain itu, unsur S (belerang) juga ditemukan dalam jumlah signifikan sebesar 5,166%, yang mengindikasikan kemungkinan terbentuknya senyawa sulfida logam seperti FeS atau FeSO_4 , terutama pada lingkungan proses yang kaya sulfat [18]. Karakteristik secara fisik *scale* dapat di lihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. *Scale*

3.3 Tingkat Keasaman Pereduksi

Pengukuran pH dilakukan untuk mengetahui kekuatan keasaman dari larutan pereduksi yang digunakan, yaitu asam organik hasil pirolisis dan larutan HCl dengan variasi konsentrasi 5–30%. Nilai pH menjadi indikator awal terhadap kekuatan asam dalam melarutkan *scale*. Hasil uji pH ditampilkan pada **Tabel 4** berikut.

Tabel 4. pH Pereduksi yang Digunakan

Pereduksi	pH
Asam organik	2.00
HCl 5%	0.86
HCl 10%	0.54
HCl 15%	0.35
HCl 20%	0.22
HCl 25%	0.11
HCl 30%	0.03

Nilai pH asam organik sebesar 2 tergolong dalam kategori asam kuat [19]. Keasaman yang tinggi berperan penting dalam reaksi reduksi *scale* karena meningkatkan kemampuan larutan dalam menyediakan ion H⁺ untuk mereduksi senyawa logam, terutama senyawa oksida [20].

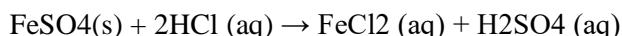
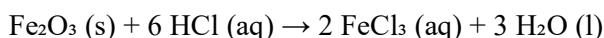
3.3 Reduksi Scale

Proses reduksi *scale* dalam penelitian ini dilakukan untuk menguji efektivitas pelarutan endapan logam oksida, terutama yang mengandung senyawa besi seperti Fe₂O₃ dan Fe₃O₄, menggunakan dua jenis larutan yaitu asam organik hasil pirolisis cangkang kelapa dan larutan HCl dengan berbagai konsentrasi. Proses reduksi *scale* menggunakan pereduksi asam organik dan HCl dapat dilihat pada **Gambar 3** sebagai berikut:

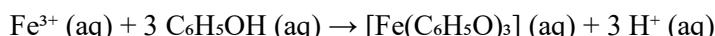
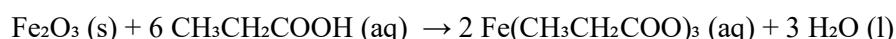


Gambar 3. Proses reduksi *scale* menggunakan pereduksi asam organik dan HCl

Reaksi kimia yang terjadi dapat digambarkan sebagai berikut:

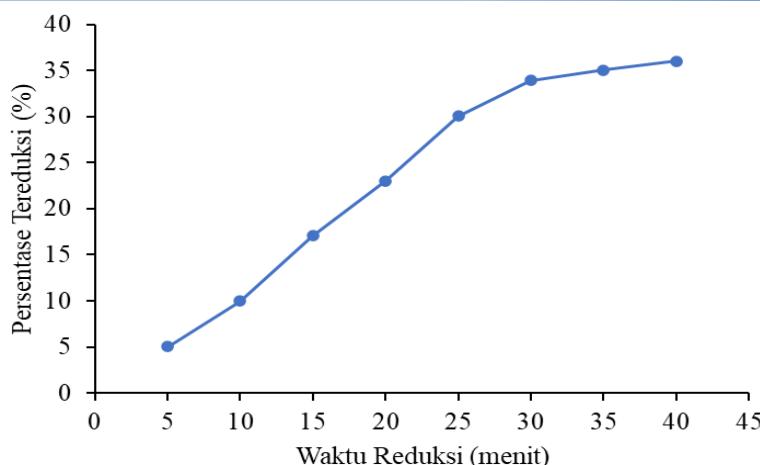


Reaksi berlangsung cepat dan efisien karena HCl, sebagai asam kuat, mendonorkan ion H⁺ secara penuh. [21] Menunjukkan bahwa HCl mampu meningkatkan laju pelarutan *scale* hingga 80% dalam waktu singkat, meski berisiko menimbulkan korosi pada logam. Sebaliknya, asam organik hasil pirolisis bekerja lebih lambat namun tetap efektif mereduksi *scale*. Asam organik yang dihasilkan menunjukkan senyawa dominan seperti fenol (27,01%), fenol 2-metoksi (13,95%), fenol 2,6-dimetoksi (10,05%), dan asam propanoat (1,32%), tergolong asam lemah dan fenolik. Senyawa ini melarutkan oksida logam melalui protonasi dan kompleksasi, dengan pembentukan ikatan koordinasi antara senyawa aktif dan ion Fe yang dapat di lihat pada skema berikut:



Liu dkk. (2023) menunjukkan bahwa asam farulat dan sinapat dari lignin dapat membentuk ikatan koordinasi dengan ion Fe³⁺, mempercepat reduksi senyawa besi tanpa menurunkan pH. Fenol dan turunannya juga memiliki kemampuan menyumbang pasangan elektron dari gugus -OH ke pusat logam, membentuk kompleks yang melarutkan oksida logam [22].

Meskipun pH larutan ini relatif tinggi (± 2), pelarutan tetap efektif karena didominasi oleh reaksi kompleksasi, bukan sekadar asam-basa. Dari aspek keberlanjutan, asam organik dari biomassa bersifat non-korosif, tidak menghasilkan asap berbahaya seperti HCl, dan mudah terdegradasi secara hayati. [13] menyatakan bahwa *bio-oil* lignin kaya fenol berpotensi sebagai pelarut ramah lingkungan untuk pengolahan limbah logam. Data **Gambar 5** menunjukkan hubungan antara waktu reduksi dan % tereduksi. Senyawa fenolik membentuk kompleks dengan Fe³⁺ melalui ikatan koordinasi, sedangkan asam propanoat berkontribusi melalui protonasi oksida logam [23].



Gambar 5. Grafik % Tereduksi *scale* menggunakan pereduksi asam organik

Berdasarkan data, reduksi *scale* meningkat signifikan dalam 25 menit pertama, dari 5,06% menjadi 30,04%. Setelahnya, laju penurunan melambat dan hanya mencapai 36,03% di menit ke-40, menandakan sistem mendekati jenuh atau kesetimbangan reaksi. Peningkatan awal disebabkan oleh senyawa aktif seperti fenol, fenol 2-metoksi, dan asam propanoat yang cepat bereaksi dengan Fe_2O_3 dan Fe_3O_4 . Tahap awal ini didominasi reaksi permukaan, yang kemudian melambat akibat saturasi oleh senyawa kompleks [24]. Setelah 30 menit, terjadi fenomena plateau, ditandai oleh kenaikan % tereduksi yang semakin kecil (33,93% ke 36,03%), diduga akibat terbentuknya lapisan kompleks teradsorpsi yang menghambat difusi senyawa aktif ke permukaan *scale* [13].

Perbandingan dengan pereduksi HCl pada **Tabel 5** menunjukkan pola konsisten: semakin tinggi konsentrasi dan lama kontak, semakin besar reduksi. Hal ini menegaskan bahwa efektivitas HCl sangat dipengaruhi oleh konsentrasi dan waktu. Sebaliknya, asam organik menunjukkan pola yang tidak linear, kemungkinan karena ionisasi lemah, sifat kimia kompleks, dan keragaman struktur molekul yang memengaruhi interaksi dengan *scale*.

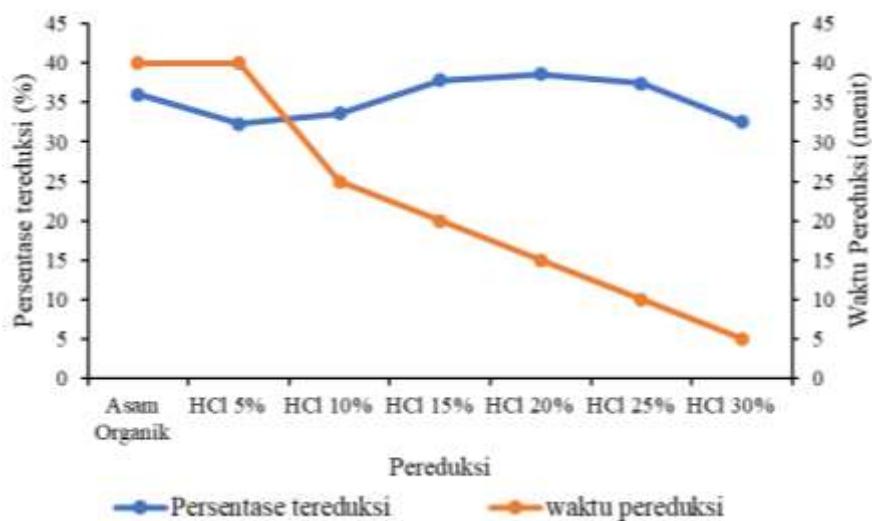
Tabel 5. Perbandingan reduksi *scale*

Waktu	Asam Organik	% Pereduksi					
		HCl					
		5%	10%	15%	20%	25%	30%
5	5.1	6.0	11.2	16.1	22.6	27.4	32.5
10	10.0	8.7	18.2	24.2	31.2	37.5	42.7
15	17.1	12.0	23.2	31.3	38.6	47.0	53.5
20	23.0	16.2	29.1	37.8	44.5	54.7	60.8
25	30.0	20.0	33.6	44.0	51.1	61.0	67.6
30	33.9	23.8	40.3	50.1	57.4	67.1	75.3
35	35.0	28.0	44.4	55.7	62.6	73.3	80.2
40	36.0	32.3	48.4	60.5	68.1	78.3	83.7

Pada menit ke-5, HCl 30% mampu mereduksi *scale* hingga 32,48%, sedangkan HCl 5% hanya 5,98%, menunjukkan bahwa konsentrasi ion H^+ yang lebih tinggi mempercepat pelarutan. Hingga menit ke-40, efisiensi HCl 30% mencapai 83,70%, jauh di atas HCl 5% yang hanya 32,28%. Perbedaan ini disebabkan oleh reaksi antara ion H^+ dan senyawa anorganik penyusun *scale* seperti Fe_2O_3 dan FeSO_4 , yang berlangsung lebih cepat pada konsentrasi H^+ tinggi.

Kecepatan reaksi meningkat seiring naiknya konsentrasi ion H^+ , sehingga HCl dengan konsentrasi lebih tinggi bekerja lebih cepat dan efisien. Namun, setelah menit ke-30, laju reaksi mulai melanda karena sebagian besar *scale* mudah larut telah bereaksi, sementara sisanya dipengaruhi oleh keterbatasan ion H^+ . Temuan ini sejalan dengan [21], yang menunjukkan bahwa pelarutan Fe_2O_3 meningkat signifikan pada $\text{HCl} \geq 15\%$ dan mencapai puncaknya di kisaran 25-30%. Setelah itu, peningkatan konsentrasi tidak memberikan tambahan efisiensi yang berarti. Grafik menunjukkan efisiensi antara HCl 25% dan 30% mulai mendekati setelah 35-40 menit.

Meski HCl menghasilkan efek lebih tinggi dalam waktu singkat, asam organik tetap mampu mendekati efektivitasnya pada kondisi tertentu, seperti ditunjukkan pada **Gambar 6** sebagai berikut:



Gambar 6. Grafik Kesetaraan Efektivitas Reduksi Scale

Berdasarkan grafik di atas, asam organik mampu mereduksi scale sebesar 36,03% dalam 40 menit. Hasil ini setara dengan HCl 15% (37,85% dalam 20 menit) dan HCl 25% (37,45% dalam 10 menit), meskipun HCl bekerja lebih cepat.

Secara kimiawi, HCl sebagai asam kuat terdisosiasi penuh dan mempercepat reaksi asam-basa melalui ion H^+ . Sebaliknya, asam organik yang terdiri dari asam lemah hanya terionisasi sebagian dan bekerja melalui dua mekanisme: protonasi permukaan scale dan kompleksasi ion logam [25]. Meskipun lebih lambat, kompleksasi memungkinkan asam organik menembus dan milarutkan scale secara stabil. Efektivitas HCl 30% dalam waktu 5 menit cenderung menurun akibat reaksi yang terlalu cepat, menghambat difusi ion H^+ ke permukaan [9], sehingga peningkatan konsentrasi tidak selalu berbanding lurus dengan efektivitas.

4. Kesimpulan

Asam organik hasil pirolisis cangkang kelapa menunjukkan kemampuan mereduksi scale yang meningkat seiring bertambahnya waktu reaksi. Persentase reduksi scale mengalami peningkatan signifikan dalam 25 menit pertama, dari 5,06% (5 menit) menjadi 30,04% (25 menit), kemudian melambat dan mencapai 36,03% pada menit ke-40. Sehingga dapat dikatakan bahwa waktu reduksi menggunakan asam organik yang optimum untuk mereduksi scale adalah 25 menit. Perbandingan pereduksi HCl dan asam organik, asam organik menunjukkan efektivitas yang lebih rendah namun tetap signifikan. HCl 30% mampu mereduksi scale hingga 83,70% dalam waktu 40 menit, sedangkan asam organik hanya mencapai 36,03% pada waktu yang sama. Namun, efektivitas asam organik pada 40 menit setara dengan kemampuan reduksi dari HCl 15% (37,85% pada 20 menit) dan HCl 25% (37,45% pada 10 menit).

5. Daftar Pustaka

- [1] Hidayat, M. T., & Untoro, E. (2022, December). Analisis Penanggulangan dan Pencegahan Problem Scale pada Flowline Sumur PMB-XXX PT Pertamina Hulu Rokan Prabumulih Field. In *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi dan Mineral* (Vol. 2, No. 1, pp. 27-34). [10.53026/sntem.v2i1.905](https://doi.org/10.53026/sntem.v2i1.905)
- [2] Astuti, D. I., Gusmawarnni, S. R., dan Budi, M. S. P. (2024). Studi Perkiraan Potensi Pembentukan Indeks Scale Calcium Carbonate Dari Sampel Brine Sintetik (Variabel CO_3 dalam Air Formasi). *Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi*, 428-436.
- [3] Evahelda, Astuti, R. P., dan Aini, S. N., Nurhadini. (2023). Pemanfaatan limbah tempurung kelapa untuk pembuatan asap cair menggunakan metode pirolisis. *AGROMIX*, 14(2), 175-181. <https://doi.org/10.35891/agx.v11i1.1672>
- [4] Sorathiya, K. B., Melo, A., Hogg, M. C., & Pintado, M. (2025). Organic acids in food preservation: exploring synergies, molecular insights, and sustainable applications. *Sustainability*, 17(8), 3434. <https://doi.org/10.3390/su17083434>

- [5] Andrika, Y. (2021). Pengaruh Asam Organik Hasil Pyrolysis Cangkang Kelapa Sawit Sebagai Pereduksi Scale Pada Pipa Distribusi. Dissertation, Universitas Islam Riau.
- [6] Agrizzi, T., Oliveira, M. A., Faria, E. V., Santos, K. G., Xavier, T. P., & Lira, T. S. (2024). Assessing coconut shell pyrolysis: Biomass characterization, activation energy estimation, and statistical analysis of operating conditions. *Bioresource Technology Reports*, 26, 101831. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101831>
- [7] Afriliana, A. N., Salasiah, & Sanjaya, A. S. (2021). Pembuatan Bio Oil Dari Cangkang Kelapa Sawit Dengan Metode Pirolisis. *Jurnal Chemurgy*, 5(2), 53-60. <http://dx.doi.org/10.30872/cmg.v5i2.4881>
- [8] Sari, D. R., & Ariani. (2021). Pengolahan Tempurung Kelapa Menjadi Arang dan Asap Cair dengan Metode Semi-Batch Pyrolysis. Distilat: Jurnal Teknologi Separasi, 7(2), 367-372. 10.33795/distilat.v7i2.236
- [9] Gamal, H., Elkhatatny, S., Al-Afnan, S., & Bahgat, M. (2021). Development of a unique organic acid solution for removing composite field scales. *ACS omega*, 6(2), 1205-1215. <https://dx.doi.org/10.1021/acsomega.0c04335>
- [10] Afridhitama, Y. (2021). Analisis Pengaruh Ekstrak Daun Gambir Sebagai Inhibitor Organik Untuk Mereduksi Pembentukan Scale. Dissertation, Universitas Islam Riau.
- [11] Gusfarizi, A. (2021). Analisis Penyebab Terbentuknya Scale Pada Pipa Produksi Di Lapangan X Dengan Metode Stiff & Davis Dan Metode Skillman, Mcdonald, Davis. Dissertation, Universitas Islam Riau.
- [12] Anggraini, S. P. A., Suprapto, S., Juliastuti, S. R., & Mahfud, M. (2024). Optimization of pyrolytic oil production from coconut shells by microwave assisted pyrolysis using activated carbon as a microwave absorber. *International Journal of Renewable Energy Development*, 13(1), 145-157. <https://doi.org/10.14710/ijred.2024.56287>
- [13] Wang, C., Xia, S., Cui, C., Kang, S., Zheng, A., Yu, Z., & Zhao, Z. (2022). Investigation into the correlation between the chemical structure of lignin and its temperature-dependent pyrolytic product evolution. *Fuel*, 329. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125215>
- [14] Mashuni, Y. N., Jahiding, M., Kadidae, L. O., Djaila, R., & Hamid, F. H. (2020). Analysis of liquid volatile matters from coconut shell pyrolysis by GC-MS and its potential as antifungal agent. *Asian J. Chem*, 32, 1728-1732. 10.14233/ajchem.2020.21657
- [15] Novita, S. A., & Fudholi, A. (2023). Efficient Bio-Oil Production from Coconut Shells Using Parabolic Solar Pyrolysis. *International Journal of Sustainable Development* <https://doi.org/10.18280/ijsdp.18120>
- [16] Amrullah, A., & Teguh, S. E. (2022). Coconut shell bio-oil distillation: Its characteristic and product distribution. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1038(1). IOP Publishing.
- [17] Saires, P., Ariza Barraza, C., Bertero, M., Pujro, R., Falco, M., & Sedran, U. (2024). Characterization of Pyrolytic Tars Derived from Different Biomasses. *Processes*, 12(4), 817. <https://doi.org/10.3390/pr12040817>
- [18] Arum, K. S., & Herawati, D. A. (2020). Pengaruh Suhu dan Waktu Reaksi Pembuatan FeSO₄ Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel Fe₂O₃ dari Limbah Besi Bubut. *Jurnal Kimia dan Rekayasa*, 1, 40-47.
- [19] Leba, M. A. U., Mau, S. D. B., Boelan, E. G., Taek, M. M., Ruas, J. D. C, Lawung, Y. D., Ruas, A. A. D.C., Kopon, A.M., & Ruas, N. A. (2023). Pigmen Umbi Ubi Jalar Ungu dan Rimpang Kunyit: Indikator Ramah Lingkungan dan Murah untuk Eksperimen Titrasi Asam-Basa. *Journal of The Indonesian Society of Integrated Chemistry*, 15(2), 99-109.
- [20] Gonzalez, R. J., Patrick, M. L., & Val, A. L. (2024). Ion uptake in naturally acidic water. *Journal of Comparative Physiology B*, 194(5), 685-696. <https://doi.org/10.1007/s00360-024-01552-6>
- [21] Malik, A., González-Gutiérrez, A. G., Calderón-Anaya, I. L., & Casillas, N. (2023). Evaluation of an organic acid descaling solution for removal calcareous scales on pipelines. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 27(11), 3119-3128.
- [22] Kulik, T., Nastasiienko, N., Palianytsia, B., Ilchenko, M., & Larsson, M. (2021). Catalytic pyrolysis of lignin model compound (ferulic acid) over alumina: Surface complexes, kinetics, and mechanisms. *Catalysts*, 11(12), 1508. <https://doi.org/10.3390/catal11121508>
- [23] Malacaria, L., Corrente, G. A., Beneduci, A., Furia, E., Marino, T., & Mazzone, G. (2021). A review on coordination properties of Al (III) and Fe (III) toward natural antioxidant molecules: Experimental and theoretical insights. *Molecules*, 26(9), 2603.

-
- [24] Bijlsma, J., de Bruijn, W. J., Hageman, J. A., Goos, P., Velikov, K. P., & Vincken, J. P. (2020). Revealing the main factors and two-way interactions contributing to food discolouration caused by iron-catechol complexation. *Scientific Reports*, 10(1), 8288.
 - [25] Santawaja, P., Kudo, S., Tahara, A., Asano, S., & Hayashi, J. I. (2022). Dissolution of iron oxides highly loaded in oxalic acid aqueous solution for a potential application in iron-making. *isij international*, 62(12), 2466 2475. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-726>