



BAB II

SELEKSI DAN URAIAN PROSES

II.1 Macam-Macam Proses

Metanol dapat terbentuk melalui beberapa macam proses berikut.

1. Pembentukan Metanol Melalui Fermentasi Biomassa
2. Pembentukan Metanol Melalui *Reforming* Metana
3. Pembentukan Metanol Melalui Gasifikasi Biomassa atau Batubara

II.1.1 Pembentukan Metanol Melalui Fermentasi Biomassa

Pembentukan metanol melalui proses fermentasi pada dasarnya merupakan serangkaian proses terintegrasi yang diawali dari konversi biomassa menjadi biogas, kemudian diikuti oleh pembentukan gas sintesis, dan diakhiri dengan sintesis katalitik metanol. Biomassa difermentasi secara anaerobik menggunakan mikroorganisme untuk menghasilkan biogas yang terutama tersusun atas metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2). Kandungan metana dalam biogas umumnya berada pada kisaran 50-75%, sedangkan karbon dioksida berkisar 25-50%, disertai sejumlah kecil uap air dan gas minor lainnya (US Patent 3982998, 1976). Secara sederhana, reaksi fermentasi biomassa dapat direpresentasikan sebagai berikut:



Biogas yang dihasilkan selanjutnya dimurnikan untuk menghilangkan pengotor seperti H_2S dan uap air, kemudian dialirkan ke unit reforming sebagai bahan baku. Pada tahap ini, metana direaksikan dengan uap air melalui reaksi *steam methane reforming* untuk menghasilkan gas sintesis yang mengandung karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H_2). Reaksi utama yang terjadi adalah:





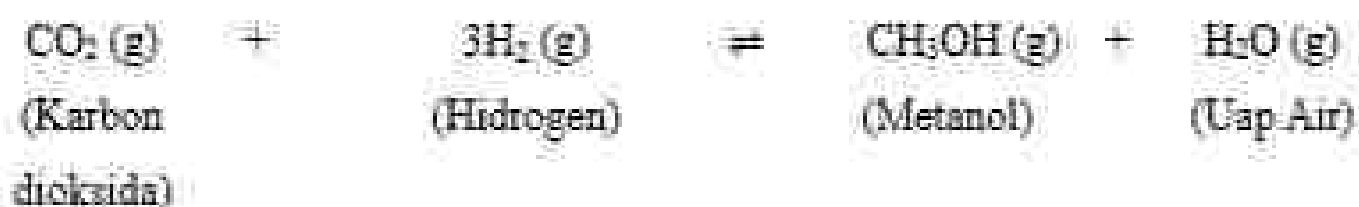
PRA RANCANGAN PABRIK

"Pabrik Metanol Dengan Proses Gasifikasi Dari Limbah Biomassa
(Tandan Kosong Kelapa Sawit) Kapasitas 415.000 Ton Tahun"

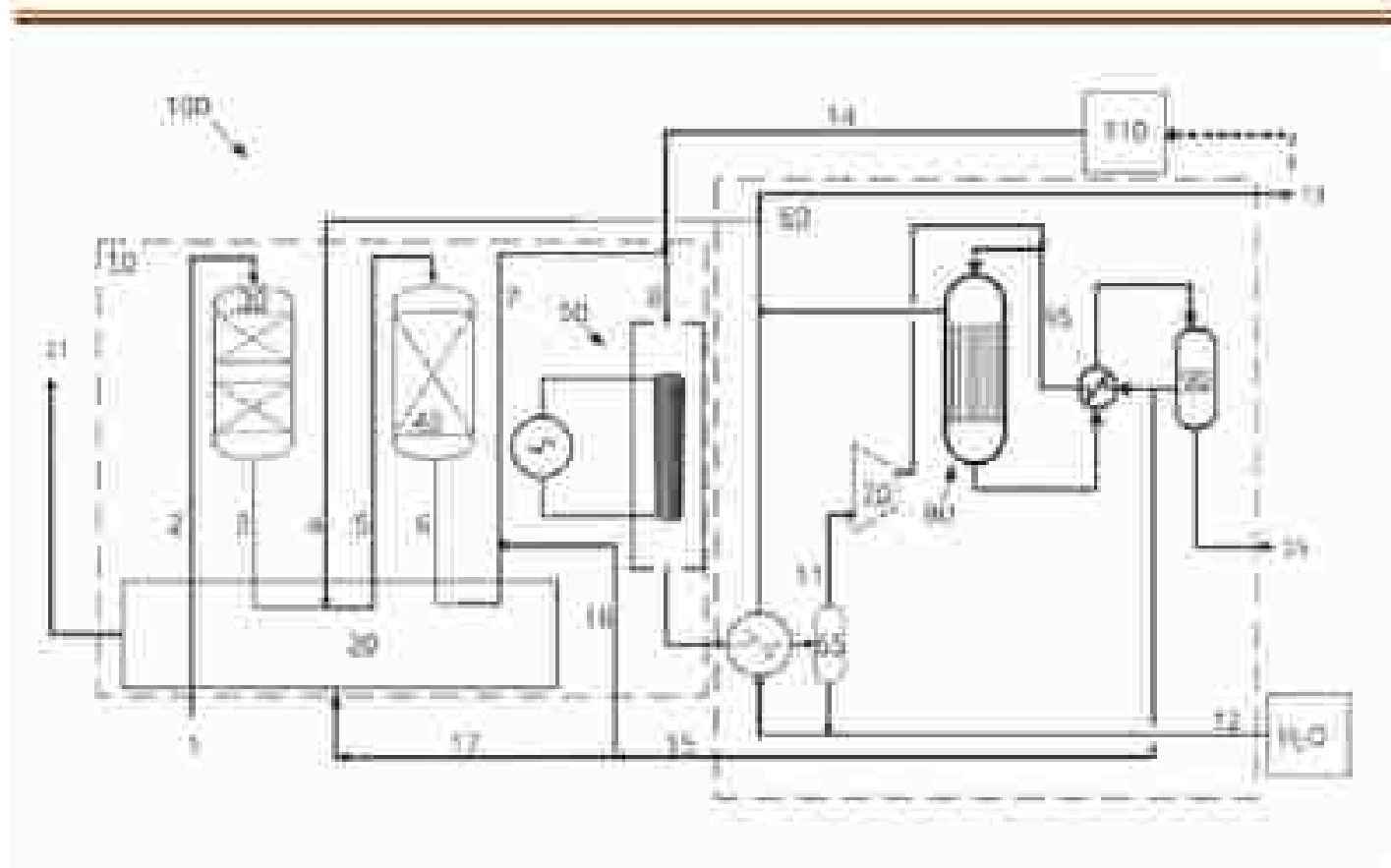
Reaksi reforming berlangsung pada temperatur tinggi, umumnya di atas 700 °C, bahkan dapat mencapai 900-1100 °C, serta pada tekanan menengah. Gas sintesis yang terbentuk kemudian disesuaikan komposisinya melalui reaksi *water gas shift* bila diperlukan, sehingga rasio H₂ terhadap CO mendekati nilai stoikiometri yang sesuai untuk sintesis metanol. Gas sintesis selanjutnya dialirkan ke dalam reaktor sintesis metanol yang berisi katalis berbasis Cu, ZnO, atau Al₂O₃. Pada reaktor tersebut, karbon monoksida dan karbon dioksida bereaksi dengan hidrogen secara eksotermis membentuk metanol. Reaksi utama yang terjadi adalah:



Selain itu, juga berlangsung reaksi hidrogenasi karbon dioksida yakni sebagai berikut :



Reaksi sintesis metanol bersifat eksotermis dan dibatasi oleh kesetimbangan, sehingga konversi per lintasan (*single pass conversion*) umumnya hanya berkisar antara 15-25% terhadap CO dan CO₂. Oleh karena itu, gas yang tidak bereaksi dipisahkan dari metanol cair yang terbentuk dan direcycle kembali ke reaktor untuk meningkatkan efisiensi proses hingga konversi keseluruhan mencapai 90%. Proses sintesis metanol biasanya dioperasikan pada temperatur 200-300 °C dan tekanan 50-100 bar agar diperoleh laju reaksi yang tinggi sekaligus kondisi kesetimbangan yang menguntungkan pembentukan metanol. Metanol yang terbentuk kemudian dikondensasikan dalam fase cair, dipisahkan dari gas sisa, dan selanjutnya dimurnikan sesuai dengan spesifikasi produk. Adapun skema alir pembentukan metanol dari biogas hasil fermentasi yang disajikan pada Gambar II.1



Gambar II. 1 Skema Pembentukan Metanol dari Biogas

(US Patent 20220306559A1, 2022)

II.1.2 Pembentukan Metanol Melalui *Reforming* Metana

Pembentukan metanol diawali dengan produksi gas sintesis (syngas) yang mengandung hidrogen (H_2) dan karbon monoksida (CO) dengan komposisi yang sesuai untuk reaksi sintesis metanol. Syngas dihasilkan melalui proses combined reforming. Bahan baku berupa gas kaya metana yang telah didesulfurisasi terlebih dahulu dikompresi sekitar 3-4 MPa dan dipanaskan hingga $\approx 350-380^\circ C$. Aliran umpan kemudian dibagi menjadi dua bagian. Aliran pertama dicampur dengan uap air dengan rasio steam terhadap karbon (S/C) sekitar 2,3-2,7 dan dipanaskan hingga $500-550^\circ C$ sebelum dialirkan ke *Gas Heated Reformer* (GHR). Pada GHR, metana bereaksi dengan uap air pada katalis berbasis nikel membentuk CO dan H_2 melalui reaksi steam methane reforming:



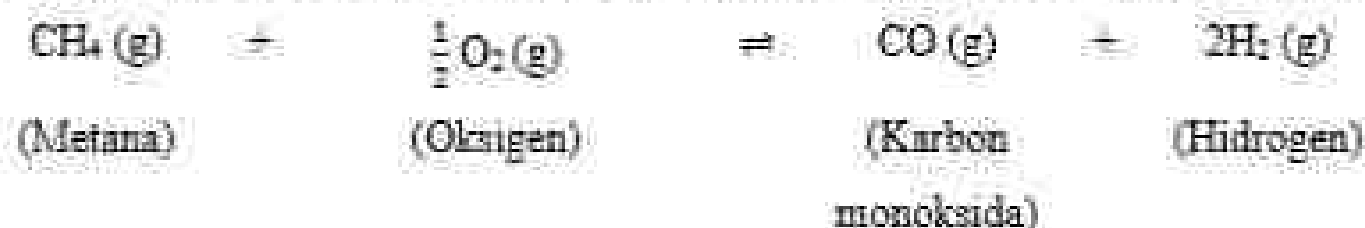
Reaksi tersebut berlangsung pada tekanan 2-4 MPa dan temperatur keluaran sekitar $600-700^\circ C$, dengan konversi metana masih bersifat parsial. Gas hasil GHR



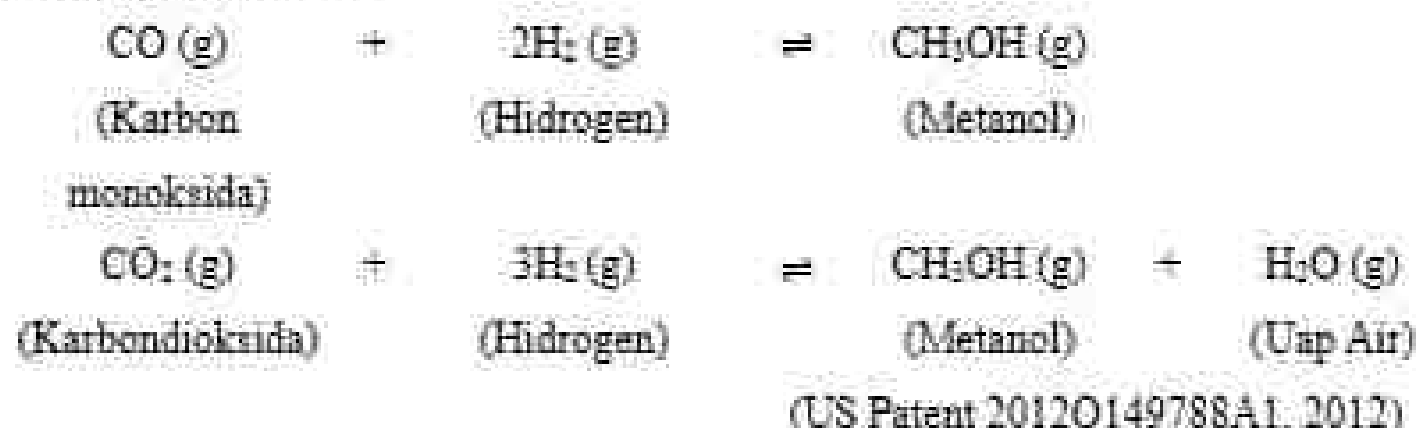
PRA RANCANGAN PABRIK

"Pabrik Metanol Dengan Proses Gasifikasi Dari Limbah Biomassa
(Tandan Kosong Kelapa Sawit) Kapasitas 415.000 Ton Tahun"

selanjutnya dialirkan ke *Steam Methane Reformer* (SMR) untuk meningkatkan konversi metana. SMR merupakan reaktor tubular dengan pemanasan eksternal yang beroperasi pada temperatur tinggi sekitar 800-880 °C dan tekanan 3-4 MPa. Pada kondisi ini, reaksi reforming berlangsung lebih intensif sehingga kandungan metana sisa dapat ditekan secara signifikan. Gas keluaran SMR kemudian dicampurkan dengan aliran kedua metana segar dan dialirkan ke *Partial Oxidation Reactor* (POX) bersama murni oksigen. POX merupakan reaktor non-katalitik yang beroperasi pada temperatur sangat tinggi, yaitu 1000-1300 °C dan tekanan sekitar 3-4 Mpa. Pada POX terjadi reaksi oksidasi parsial metana yang bersifat eksotermik:



Panas yang dihasilkan dimanfaatkan untuk mendukung kebutuhan energi proses reforming sebelumnya, sehingga efisiensi energi sistem meningkat. Gas keluaran POX berupa syngas dengan kandungan utama H_2 , CO, dan CO_2 , kemudian didinginkan dan disesuaikan tekanannya sebelum dialirkan ke unit sintesis metanol. Pada proses selanjutnya dikonversi menjadi metanol pada katalis Cu, ZnO, atau Al_2O_3 melalui reaksi :



II.1.3 Pembentukan Metanol Melalui Gasifikasi Biomassa atau Batubara

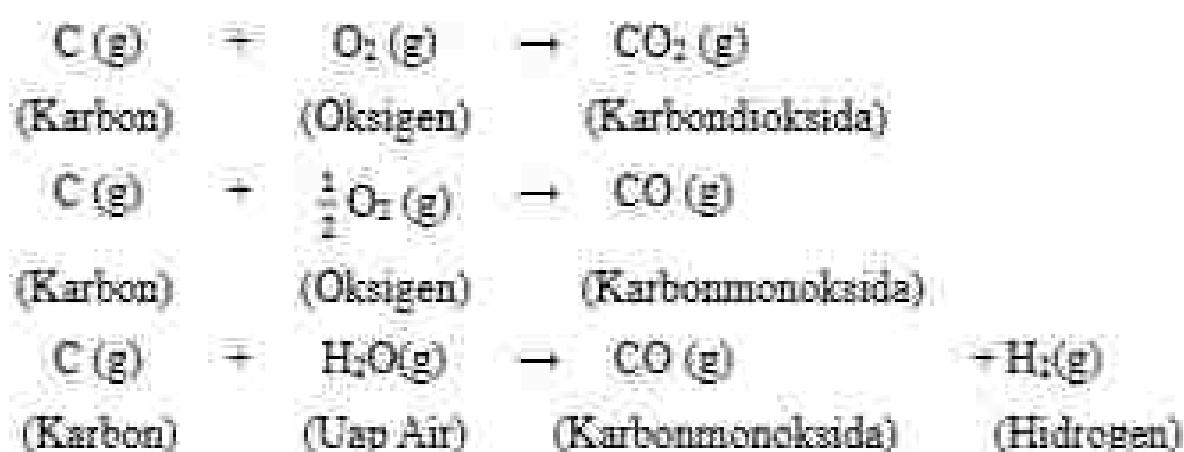
Pembentukan metanol melalui gasifikasi biomassa atau batubara diawali dengan konversi bahan baku padat menjadi gas sintesis (syngas) yang mengandung karbon monoksida (CO), hidrogen (H_2), dan karbon dioksida (CO_2). Biomassa atau batubara terlebih dahulu mengalami tahap pengeringan dan penggilingan untuk memperoleh ukuran partikel yang sesuai sebelum dimasukkan ke dalam gasifier.



PRA RANCANGAN PABRIK

"Pabrik Metanol Dengan Proses Gasifikasi Dari Limbah Biomassa
(Tandan Kosong Kelapa Sawit) Kapasitas 415.000 Ton Tahun"

Proses gasifikasi berlangsung pada fase padat-gas dengan menggunakan agen gasifikasi berupa nap air, oksigen, atau campurannya, pada temperatur tinggi sekitar 800-1200 °C dan tekanan yang dapat bervariasi dari atmosfer hingga tekanan menengah, tergantung desain reaktor gasifikasi yang digunakan. Pada gasifier terjadi beberapa reaksi utama, yaitu reaksi oksidasi parsial, reaksi gasifikasi, dan reaksi kesetimbangan. Karbon dari biomassa atau batubara bereaksi dengan oksigen membentuk CO dan CO₂ secara eksotermik, yang menyediakan panas bagi reaksi endotermik gasifikasi dengan nap air:



Selain itu, reaksi water gas shift juga berlangsung untuk menyamakan rasio H₂/CO dalam syngas:

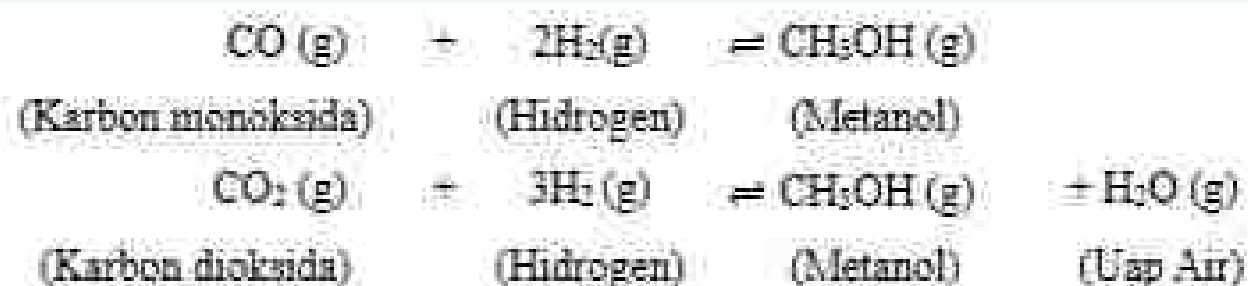


Gas sintesis kasar yang dihasilkan kemudian keluar dari gasifier dalam fase gas dan masih mengandung pengotor seperti partikulat abu, tar, sulfur, dan senyawa nitrogen. Oleh karena itu, syngas harus melalui unit pendinginan dan pembersihan gas, seperti cyclone, scrubber, dan unit penghilangan sulfur, untuk mencegah kontaminan katalis pada tahap berikutnya. Syngas bersih selanjutnya dikondisikan melalui penyesuaian rasio H₂/CO, baik dengan reaksi water gas shift tambahan maupun dengan pemisahan CO₂, sehingga diperoleh komposisi yang sesuai untuk sintesis metanol. Syngas kemudian dikompresi dan dialirkan ke reaktor sintesis metanol yang berisi katalis Cu, ZnO, atau Al₂O₃. Pada reaktor tersebut, syngas dikonversi menjadi metanol pada temperatur sekitar 200-280 °C dan tekanan 5-10 MPa melalui reaksi utama:

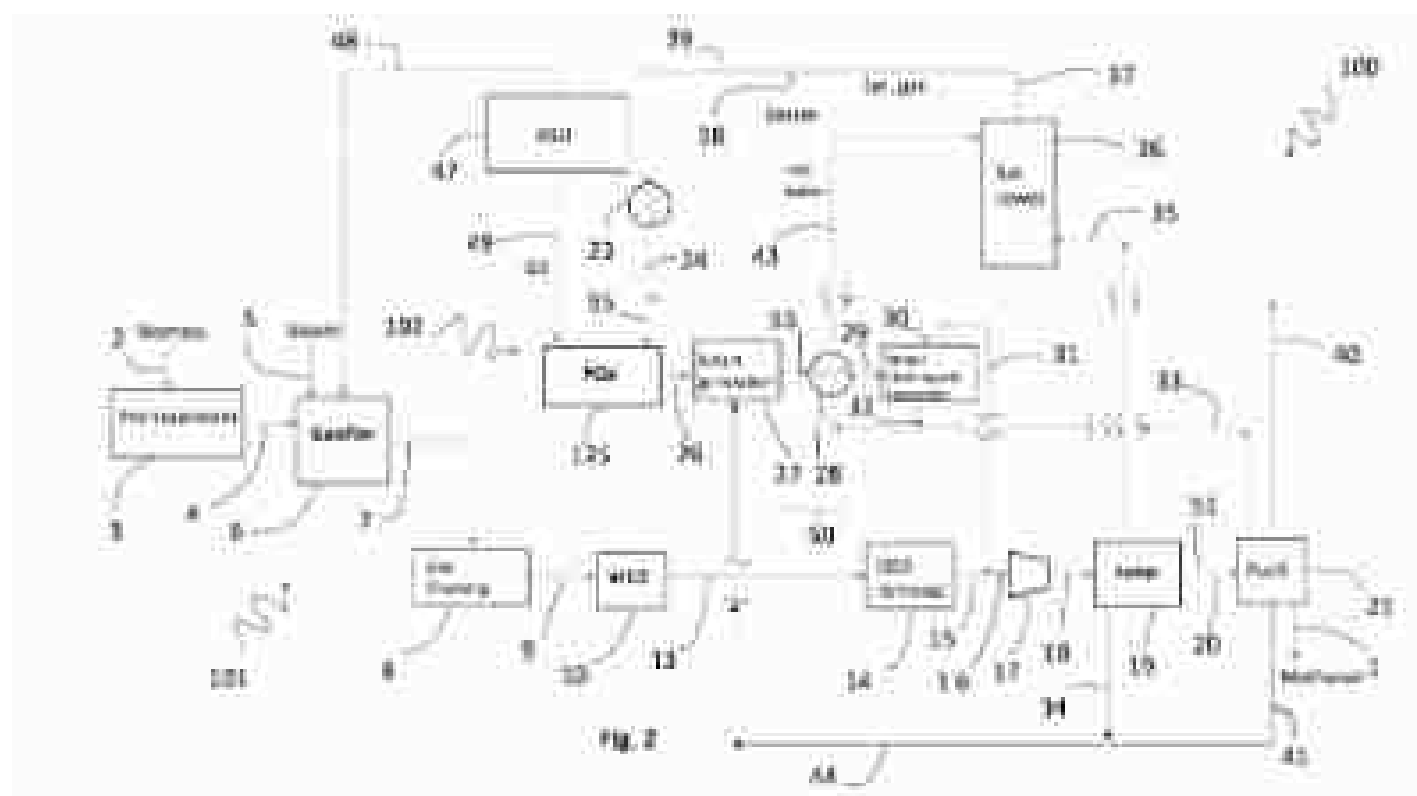


PRA RANCANGAN PABRIK

"Pabrik Metanol Dengan Proses Gasifikasi Dari Limbah Biomassa
(Tandan Kosong Kelapa Sawit) Kapasitas 415.000 Ton Tahun"



Adapun skema pembentukan metanol melalui gasifikasi biomassa atau batubara yakni sebagai berikut :



Gambar II. 2 Skema Pembentukan metanol melalui gasifikasi biomassa atau batubara

(US Patent 20250042829A1, 2025)



PRA RANCANGAN PABRIK

"Pabrik Metanol Dengan Proses Gasifikasi Dari Limbah Biomassa (Tandan Kosong Kelapa Sawit) Kapasitas 415.000 Ton Tahun"

II.2 Pemilihan Proses

Berdasarkan beberapa proses yang dapat dilakukan dalam pembentukan Metanol, dapat dibuat perbandingan sebagai berikut.

Tabel II. 1 Pemilihan proses pembuatan Metanol dari *Syn gas*

No.	Parameter	Metanol Melalui Gasifikasi	Metanol Melalui <i>Reforming</i> Metana	Metanol Melalui Proses Fermentasi
1.	Bahan baku	Biomassa (renewable)	Natural Gas (non renewable)	Biomassa (renewable)
2.	Harga bahan baku	Murah	Lebih mahal	Murah
3.	Fase	Padat-gas	Gas-gas	Cair-gas
4.	Aplikasi di Industri	35%	65%	-
5.	Suhu operasi	200-1500°C	200-800°C	30-3000°C
6.	Alat Utama	Gasifier, reaktor metanol	Reformer, reaktor metanol	Digester, reformer, reaktor metanol
7.	Produk samping	Ash, CO ₂	CO ₂	CO ₂ dan sludge
8.	Waktu	< 1 hari	< 1 hari	8-10 hari
9.	Yield	±18,5 mol/kg biomassa	±0,95-98 mol/mol metana	Metana (±0,236), Methanol ±0,95-98 mol/mol metana)
Sumber		(Yang dkk., 2018)	(US Patent 2012O149788A1, 2012)	(US Patent 2012O149788A1, 2012; UK Patent 2375353B, 2002)

Berdasarkan perbandingan antara beberapa proses tersebut, proses gasifikasi dipilih sebagai proses dalam pembuatan metanol. Berikut ini beberapa alasannya.



PRA RANCANGAN PABRIK

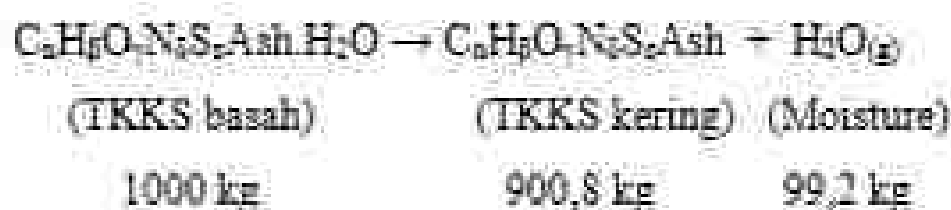
"Pabrik Metanol Dengan Proses Gasifikasi Dari Limbah Biomassa
(Tandan Kosong Kelapa Sawit) Kapasitas 415.000 Ton/Tahun"

1. Proses dan peralatan yang digunakan sudah cukup umum dalam industri petrokimia.
2. Harga bahan baku yang lebih terjangkau dan terbarukan.
3. Waktu operasi yang relatif singkat dan proses sudah diaplikasikan oleh beberapa perusahaan di luar negeri.

II.3 Potensial Ekonomi

Basis 1000 kg TKKS basah ($C_6H_6O \cdot N_2S_2Ash \cdot H_2O$)

1. Pengeringan



Komposisi:

$$\text{Ash} = (1000 \times \% \text{Ash}) = 94,6$$

$$\text{Massa bebas abu} = 900,8 - 94,6 = 806,2 \text{ kg}$$

2. Gasifikasi

Kandungan dari TKKS

Komponen	% dbaf	BM (kg/kmol)	% wb	% Massa	% mol
C	46.53	12	37.51	375.12486	31.260405
H	5.31	1	4.28	42.80922	42.80922
O	47.1	16	37.97	379.7202	23.7325125
N	0.84	14	0.68	6.77208	0.48372
S	0.22	32	0.18	1.77364	0.05542625
Total	100.00	13,3379	80.62	806.2	98.34128375

dbaf : *dry basis ash free*

wb : *wet basis*

Basis : 1000 Kg basis basah

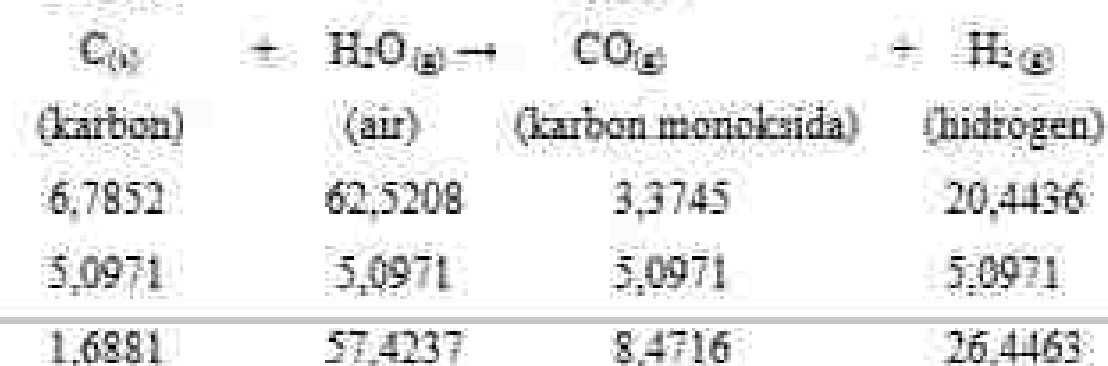
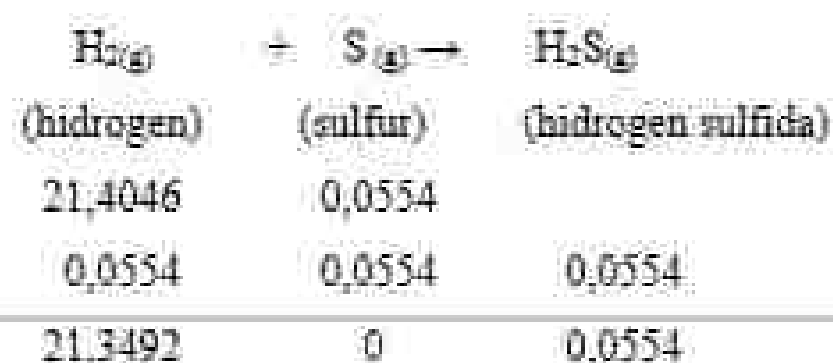
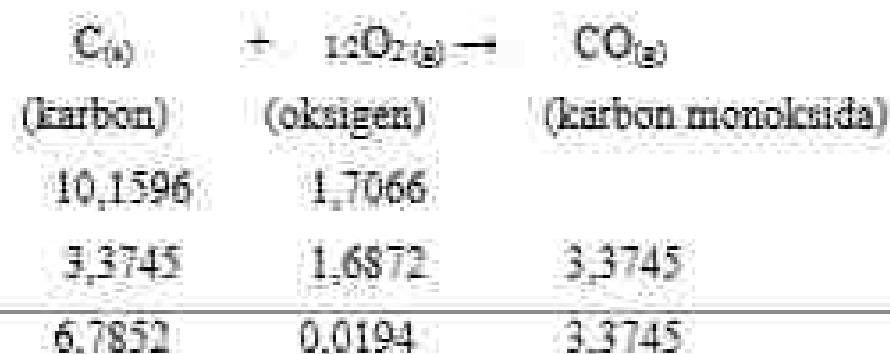
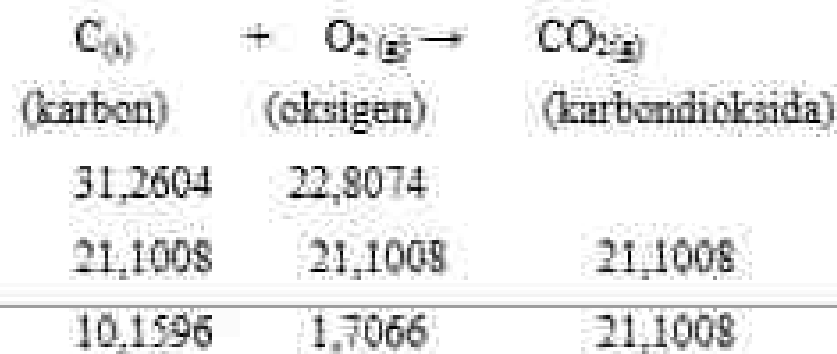
Adapun rasio perbandingan antara Steam/Karbon (mol) = 2 dan Oksigen/karbon sebesar 0,35.



PRA RANCANGAN PABRIK

"Pabrik Metanol Dengan Proses Gasifikasi Dari Limbah Biomassa
(Tandan Kosong Kelapa Sawit) Kapasitas 415.000 Ton Tahun"

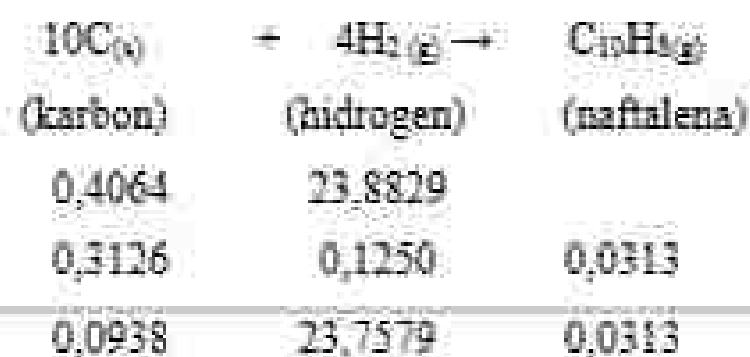
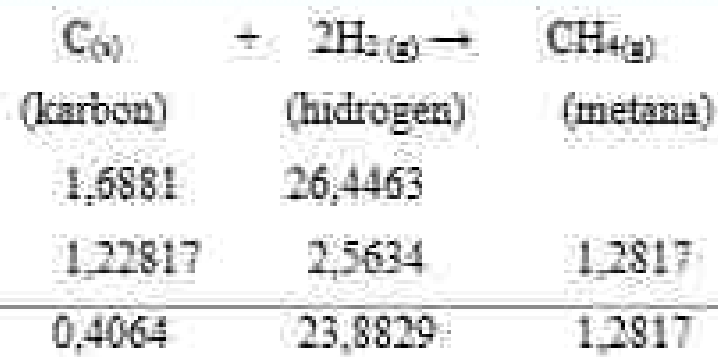
Komposisi yield gas dari karbon yang terkonversi menjadi gas adalah 0,271 CO/C, 0,041 CH₄/C, 0,675 CO₂/C, 0,76 H₂/C dan 0,01 C₂++/C (tar) dalam satuan mol. Adapun beberapa reaksi yang terjadi dalam proses gasifikasi yang berlangsung yaitu:





PRA RANCANGAN PABRIK

"Pabrik Metanol Dengan Proses Gasifikasi Dari Limbah Biomassa
(Tandan Kosong Kelapa Sawit) Kapasitas 415.000 Ton/Tahun"

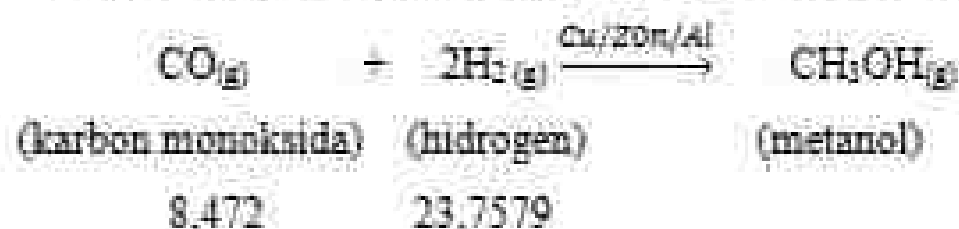


Sehingga diperoleh

TKKS		Raw syn gas	
Komponen (Kg)			
C	375,12	CO	237,20
H	42,81	CH ₄	20,51
O	379,72	CO ₂	928,43
N	6,77	H ₂	47,52
S	1,77	C ₁₀ H ₈	4,00
Ash	94,60	H ₂ O	1033,6
Subtotal	900,8	H ₂ S	1,88
Gasifier agent		N ₂	6,77
H ₂ O	1125,37	Subtotal	2.279,94
O ₂	350,12	Residu padat	
Subtotal	1475,49	Ash	94,60
		Char	1,75
		Subtotal	96,35
Total	1475,49	Total	2376,29

3. Sintesis Metanol

Konversi CO: 99,00% (US Patent 3.512.599, 1996)





PRA RANCANGAN PABRIK

"Pabrik Metanol Dengan Proses Gasifikasi Dari Limbah Biomassa
(Tandan Kosong Kelapa Sawit) Kapasitas 415.000 Ton Tahun"

8,387	16,773	8,387	
0,0847	6,9841	8,387	
$\text{CO}_{2(g)} + 3\text{H}_2(g) \xrightarrow{\text{Cu/Zn/Al}} \text{CH}_3\text{OH}_g + \text{H}_2\text{O}_g$			
(karbon dioksida)	(hidrogen)	(metanol)	(air)
21,101	6,984		
2,305	6,914	2,305	2,305
18,796	0,06984	2,305	2,305

Tabel II. 2 Harga bahan dan produk pembentukan metanol melalui proses gasifikasi biomassa

Bahan /produk	Senyawa	Jumlah		Harga/kg	Total (Rp)
		mol	kg		
Bahan	TKKS		1.000	200	546.293,23
	O ₂	7,81	350,12	290,7	
	H ₂ O	62,52	1.125,4	307,713	
Produk	CO ₂	17,4	827,02	4.290	7.204.784,99
	CH ₃ OH	9,93	342,132	10.351,368	
	C ₁₀ H ₈	0,031	4,001	3.450,5	
	CH ₄	3,427	20,51	4.950	

Potensi keuntungan dalam produksi metanol per kilo

$$\begin{aligned} EP &= (\text{Total Produk} - \text{Total bahan}) : \text{jumlah dalam kg} \\ &= (7.204.784,99 - 546.293,23) : 342,132 \text{ kg} \\ &= \text{Rp } 19.461,74 / \text{kg} \end{aligned}$$

$$\text{Rasio produk dan reaktan} = 7.204.784,99 : 546.293,23 = 13,2 : 1$$

Berdasarkan hasil analisis perhitungan, diperoleh bahwa proses pembentukan metanol melalui proses gasifikasi biomassa memiliki potensial ekonomi positif sebesar Rp 19.461,74 per kilogram produk dan Rasio produk-reaktan yang cukup tinggi sebesar 13,2 : 1. Nilai positif ini menunjukkan bahwa harga jual metanol dan karbon dioksida lebih tinggi dibandingkan total harga bahan



PRA RANCANGAN PABRIK

"Pabrik Metanol Dengan Proses Gasifikasi Dari Limbah Biomassa (Tandan Kosong Kelapa Sawit) Kapasitas 415.000 Ton Tahun"

baku yang digunakan, yaitu TKKS, Steam dan oksigen. Dengan demikian, secara sederhana dapat disimpulkan bahwa proses ini berpotensi ekonomis untuk dikembangkan apabila efisiensi proses dan pemanfaatan produk samping dapat dijaga dengan baik.

II.4 Uraian Proses

Proses sintesis metanol dari limbah Tandan kosong kelapa sawit dengan proses gasifikasi melalui beberapa tahap berikut:

1. Tahap Penyimpanan dan Preparasi Bahan Baku

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dari supplier, masuk ke dalam pabrik dalam bentuk bongkahan dengan diameter rata-rata sebesar 40 cm (Hidayah & Wusko, 2020), yang disimpan dalam gudang tertutup. Bongkahan TKKS dilakukan size reduction menggunakan alat Shredder Machine hingga ukuran menjadi 5 cm. Kemudian dikeringkan menggunakan *rotary dryer* dengan udara kering suhu 200°C untuk menghilangkan kandungan air dalam TKKS yang semula 9,92% (Rahman dkk., 2020). Kemudian TKKS yang telah kering dipindahkan menuju Hammer Mill menggunakan Belt Conveyor untuk dikecilkan kembali hingga berukuran 2 mm. Keluaran hammer mill kemudian dilakukan pengayakan menggunakan Screener untuk menyeragamkan ukuran 2 mm dan ukuran diatas 2 mm tetap akan berada dalam Hammer Mill. *Liquidified* oksigen dengan kemurnian 100% masuk dalam preheater untuk dipanaskan hingga suhu 500°C.

2. Tahap Pembentukan Syngas

Biomassa TKKS digasifikasi dalam kondisi bertekanan dan dalam kehadiran oksigen dan uap. Proses gasifikasi terjadi di dalam gasifier tipe *entrained flow*. Gasifier menggunakan uap-oksigen sebagai agen gasifikasi. Komposisi gas sintesis (syngas) sebagai hasil gasifikasi dihitung berdasarkan reaksi kesetimbangan pada suhu 1200 °C tekanan 40 atm, dan proses diasumsikan isothermal selama reaksi gasifikasi. Gasifikasi juga terjadi dalam kehadiran uap, yang diperlukan sebagai agen reforming metana dan rantai hidrokarbon yang lebih panjang (C2+). Reaksi endotermik ini memerlukan energi yang disediakan oleh pembakaran, sehingga konsumsi oksigen meningkat seiring dengan input uap. Penggunaan tekanan tinggi



dan oksigen sebagai media oksidasi lebih menguntungkan daripada menggunakan udara. Penggunaan oksigen daripada udara juga memiliki keuntungan menghindari pengenceran syngas dengan nitrogen, yang sangat penting jika tujuan utamanya adalah mengubah syngas menjadi produk kimia. Parameter optimal dalam proses gasifikasi yaitu rasio $[H_2O]/[C \text{ pada biomassa}]$ sebesar 2 dan rasio $[O_2]/[C \text{ pada biomassa}]$ sebesar 0,35. Proses gasifikasi menghasilkan produk padat berupa slag campuran abu dan char ($C_8H_7O_2$) dari sisa bahan baku. Produk gas masih berupa *syn gas* yang mentah mengandung pengotor seperti tar atau naphta ($C_{10}H_8$) dan asam sulfida (H_2S). Komposisi yield gas dari karbon yang terkonversi menjadi gas adalah 0,271 CO/C , 0,11 CH_4/C , 0,675 CO_2/C , 0,76 H_2/C dan 0,01 (tar) dalam satuan mol. Luaran gasifier akan masuk ke dalam *quench tower* untuk mendinginkan dan memadamkan slag sehingga tidak menyebabkan kerusakan pada komponen dibawahnya dengan suhu luaran *syn gas* adalah $800^\circ C$. Reaksi yang terjadi pada tahapan ini yaitu:



(Ogi dkk., 2013)

3. Tahap Rekomposisi *Syn gas*

Syn gas mentah akan didinginkan suhu $400^\circ C$ dengan *waste heat boiler* untuk *recovery* panas kemudian *syn gas* melalui proses pemisahan dengan guard bed terdiri dari adsorbent ZnO untuk menghilangkan H_2S . CO_2 dalam aliran akan dipisahkan agar proses reaksi metanol dapat maksimal, dimana dapat dilakukan melalui proses dan teknologi yang sudah dikenal, yaitu absorpsi kimia MDEA (monoetanolamine). CO_2 yang dihilangkan hingga 90-100%. Absorber beroperasi pada tekanan 40 atm dan suhu $75^\circ C$ dengan konsentrasi pelarut MDEA 25,73% dan air 65%. Larutan yang mengandung karbon dioksida akan melalui *recovery* dengan



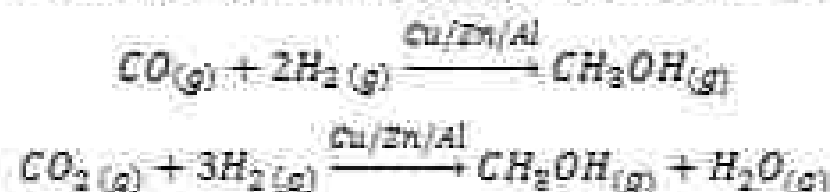
PRA RANCANGAN PABRIK

"Pabrik Metanol Dengan Proses Gasifikasi Dari Limbah Biomassa
(Tandan Kosong Kelapa Sawit) Kapasitas 415.000 Ton Tahun"

kolom stripper sehingga pelarut amine dapat digunakan kembali dan karbon dioksida dapat disimpan sebagai produk samping. Larutan amine akan dipanaskan sehingga kelarutan karbon dioksida menurun.

4. Tahap Pembentukan Metanol

Sweet syn gas dikompresi menjadi 75 atm dan Suhu dipertahankan pada 250 °C sepanjang reaksi dengan bantuan katalis *copper-zinc-alumina*. Pendingin air digunakan untuk mempertahankan suhu reaktor metanol. Produk reaktor metanol didinginkan hingga 50 °C, aliran keluar cairan dari pemisah gas-cair mengalir ke bagian pemurnian. Sintesis metanol dari *syn gas* terjadi reaksi berikut:



5. Tahap Pemurnian Produk

Tahap pemurnian melalui alat flash drum untuk memisahkan komponen fase gas dan cair, dimana flash drum akan memisahkan *syn gas* yang tidak bereaksi. Fase cair berupa *liquid crude methanol* yang telah terpisah berupa akan masuk expansion vessel untuk menyesuaikan tekanan pada 2 atm lalu dipanaskan sebelum diumpan ke dalam kolom distilasi. Proses pemisahan metanol air menggunakan alat distilasi berdasarkan titik didihnya, dimana metanol akan keluar sebagai distilat dengan kemurnian 99,85% dan produk bawah berupa air yang akan dialirkan menuju limbah cair.

(US Patent 20250042829A1, 2025)

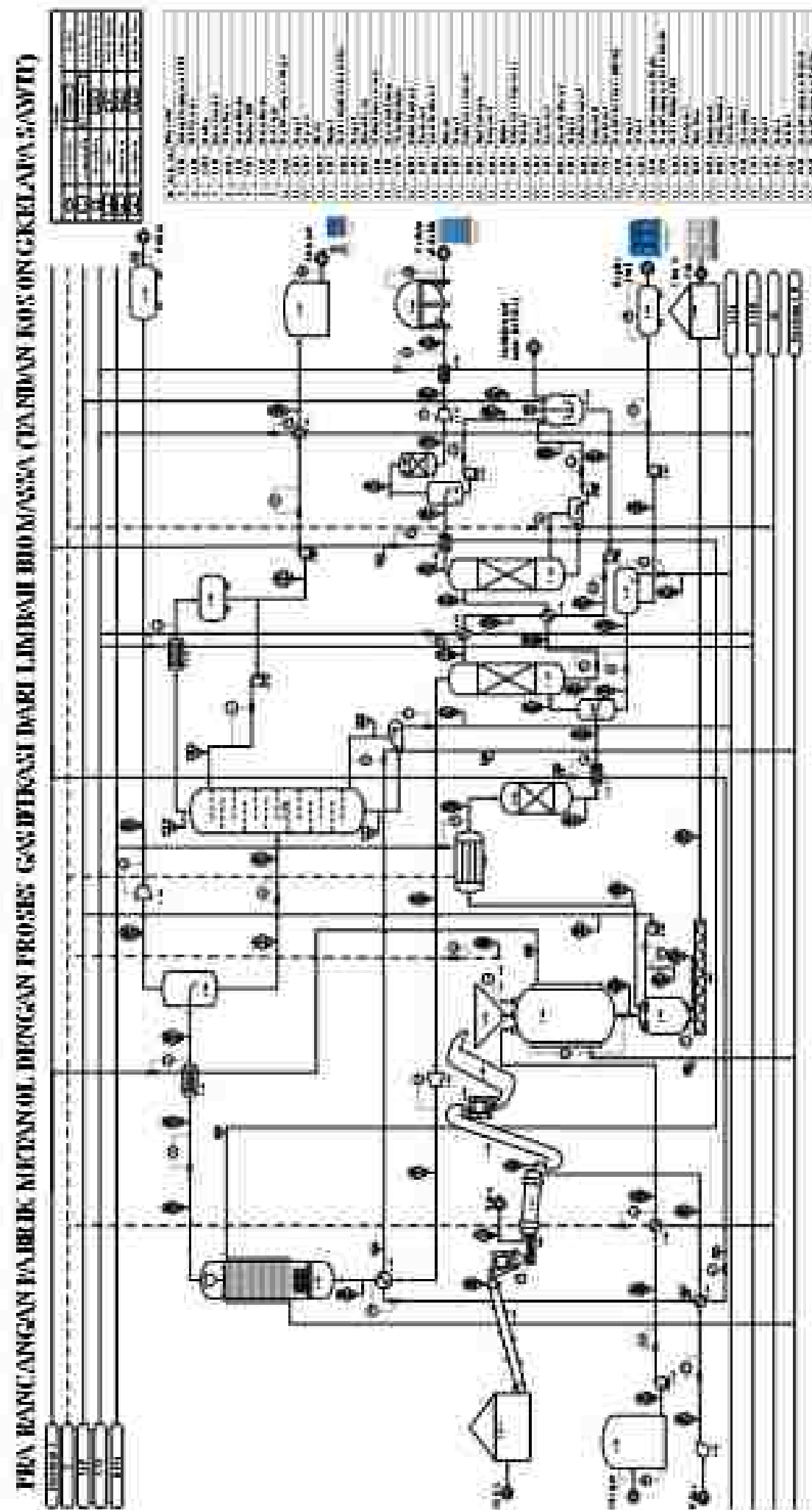




PRA RANCANGAN PABRIK

"Pabrik Metanol Dengan Proses Gasifikasi Dari Limbah Biomassa (Tandan Kosong Kelapa Sawit) Kapasitas 415.000 Ton Tahun"

II.6 Diagram Alir Pengembangan



Gambar II. 4 Diagram Alir Pengembangan Pra Rancangan Pabrik Metanol Dengan Proses Gasifikasi Dari Limbah Biomassa (Tandan Kosong Kelapa Sawit)