

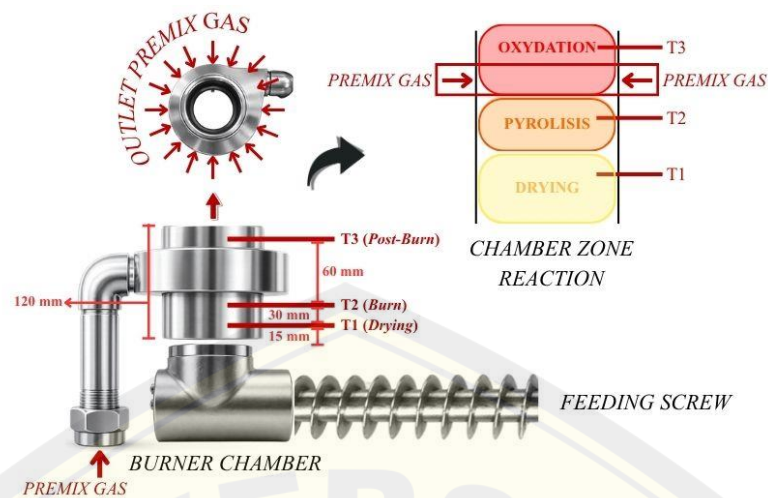
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

Penelitian ini dilakukan pada tipe reaktor *moving fluidized bed gasifier* berbahan bakar biomassa kulit kopi dengan memvariasikan *Air–Fuel Ratio (AFR)* pada sistem *starter premix* udara–LPG. Variasi *AFR* diperoleh dengan mengatur debit udara dan debit LPG menggunakan *flowmeter* sehingga menghasilkan beberapa kondisi *lean fuel* hingga *ultra-lean fuel*. Selama proses *initial ignition*, dilakukan pengamatan terhadap dinamika penyalan biomassa yang meliputi *ignition time*, kenaikan temperatur *bed*, kadar *syngas* (H_2 , CO , dan CH_4), serta *burning rate*. Seluruh parameter direkam secara *real-time* sejak *premix starter* hingga tercapai kondisi *starter-off* sebagai indikator bahwa proses gasifikasi mampu berlangsung secara mandiri. Hasil pengujian selanjutnya dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh variasi *AFR* terhadap karakteristik dinamis pembakaran biomassa kulit kopi dan menentukan kondisi operasi yang menghasilkan proses *starter* paling stabil dan efektif.

4.1.1 Temperatur Bed Gasifikasi

Temperatur *bed* gasifikasi diamati dari 3 titik temperatur pada area *chamber* dengan memperhatikan daerah persebaran temperatur proses awal gasifikasi yaitu T_1 temperatur pengeringan (*drying*), T_2 temperatur pembakaran (*burn*), dan T_3 temperatur pasca pembakaran (*post-burn*). Posisi peletakkan *thermocouple* mengacu pada Gambar 4.1 dibawah ini yaitu T_1 berjarak 30 mm dari posisi T_2 dan posisi T_3 berjarak 60 mm dari posisi T_2 . *Thermocouple* yang digunakan yaitu *thermocouple type-k* yang dihubungkan dengan sensor MAX6675 sebagai *data logger*.



Gambar 4.1 Burner Chamber System

Pada Tabel 4.1 di bawah ini, diketahui bahwa temperatur rata-rata maksimal *bed* gasifikasi berada pada temperatur pasca pembakaran (*post-burn*) yaitu pada variasi *AFR* 38,3:1 dengan temperatur 482,82°C dan *ignition time* selama 542 detik, sedangkan temperatur rata-rata terendah terjadi pada variasi *AFR* 17,55:1 dengan temperatur 403,56°C. Pada temperatur pengeringan (*drying*) dan pembakaran (*burn*), terlihat bahwa temperatur rata-rata tertinggi berada pada variasi *AFR* 38,30:1 dengan nilai masing-masing 247°C dan 295,56°C, sedangkan nilai rata-rata terendah berada pada variasi *AFR* 76,60:1 dengan nilai 194,30°C dan 257,19°C.

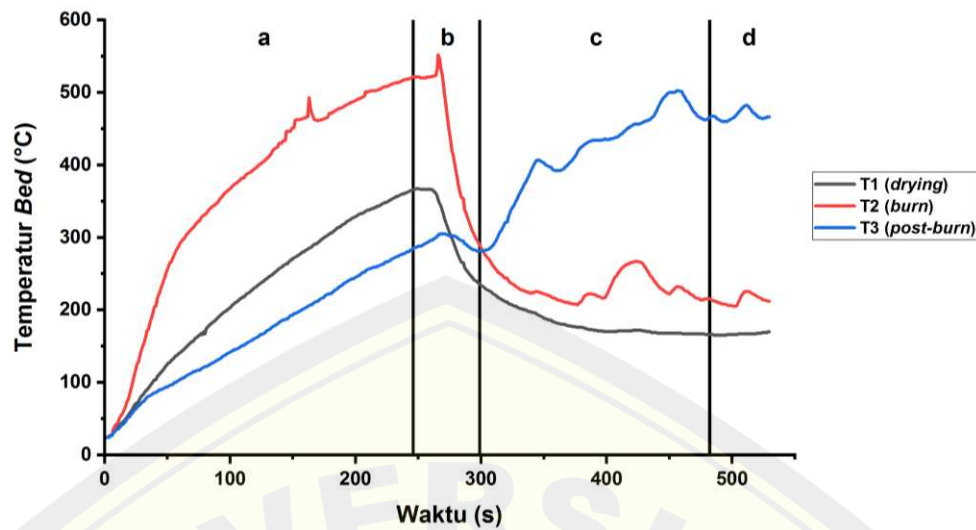
Tabel 4.1 Data Temperatur *Bed* Gasifikasi

No.	Laju Aliran Udara (LPM)	Laju Aliran LPG (LPM)	<i>Air-Fuel Ratio</i> (<i>AFR</i>)	Temperatur <i>Bed</i> (°C)			<i>Ignition Time</i> (s)
				(T ₁) (<i>Drying</i>)	(T ₂) (<i>Burn</i>)	(T ₃) (<i>Post Burn</i>)	
1.	55	1,88	17,55:1	203,91	268,14	403,56	530
2.	60	0,94	38,30:1	247,00	295,56	482,82	542
3.	50	0,47	63,83:1	197,89	261,95	439,04	683
4.	60	0,47	76,60:1	194,30	257,19	453,69	943

Berdasarkan Gambar 4.2 dibawah, menunjukkan perubahan temperatur *bed* terhadap *ignition time* pada kondisi *AFR* 17,55:1 selama proses pembakaran

biomassa kulit kopi. Secara umum, proses ini dibagi menjadi empat tahap, yaitu *premix starter*, *feed starter*, *homogenizing*, dan *syngas production*. Tahap *premix starter* berlangsung pada detik ke 1 hingga 246, ketika *burner premix* udara–LPG dioperasikan tanpa suplai biomassa sehingga energi panas sepenuhnya berasal dari pembakaran *premix*. Pada tahap ini temperatur T_2 (*burn*) meningkat paling cepat hingga mencapai 522°C , sedangkan temperatur T_1 (*drying*) dan T_3 (*post burn*) meningkat secara bertahap hingga masing-masing mencapai sekitar 366°C dan 285°C . Kondisi tersebut menunjukkan bahwa energi panas masih terkonsentrasi di sekitar area *burner* sebelum ditransfer ke seluruh *bed*. Selanjutnya, pada tahap *feed starter* yang berlangsung dari detik ke 247 hingga 299, biomassa mulai dimasukkan ke dalam reaktor sehingga temperatur pada T_1 dan T_2 mengalami penurunan yang cukup signifikan sekitar 236°C dan 290°C . Penurunan ini terjadi karena sebagian besar energi pembakaran digunakan untuk memanaskan biomassa, menguapkan kadar air, dan memulai proses dekomposisi termal, sehingga temperatur *bed* menurun sementara akibat meningkatnya kebutuhan energi pada fase awal penyalaan.

Tahap *homogenizing* berlangsung pada detik ke 300 hingga 482 dan ditandai dengan peningkatan temperatur T_3 hingga mencapai 502°C , sementara temperatur T_1 dan T_2 cenderung menurun kemudian stabil pada kisaran 160 – 220°C . Fenomena ini menunjukkan bahwa panas telah terdistribusi secara lebih merata ke seluruh *bed* sehingga zona reaksi mulai bergeser dari area *burning* menuju area pengeringan (*drying*). Pergeseran temperatur maksimum dari T_2 ke T_3 mengindikasikan bahwa sumber panas tidak lagi didominasi oleh pembakaran *premix* udara–LPG, tetapi mulai dihasilkan oleh reaksi yang berlangsung di dalam *bed* biomassa. Selanjutnya, pada tahap *syngas production* yang berlangsung dari detik ke 483 hingga 530, temperatur T_3 relatif stabil pada kisaran 466 – 482°C dengan fluktuasi yang kecil, sedangkan temperatur T_1 dan T_2 juga menunjukkan kondisi yang stabil. Kondisi ini menunjukkan bahwa reaktor telah memasuki kondisi transisi menuju proses gasifikasi (*starter-off*), dimana energi panas mampu dipertahankan oleh reaksi di dalam *bed* sehingga pembentukan *syngas* dapat berlangsung secara berkelanjutan.



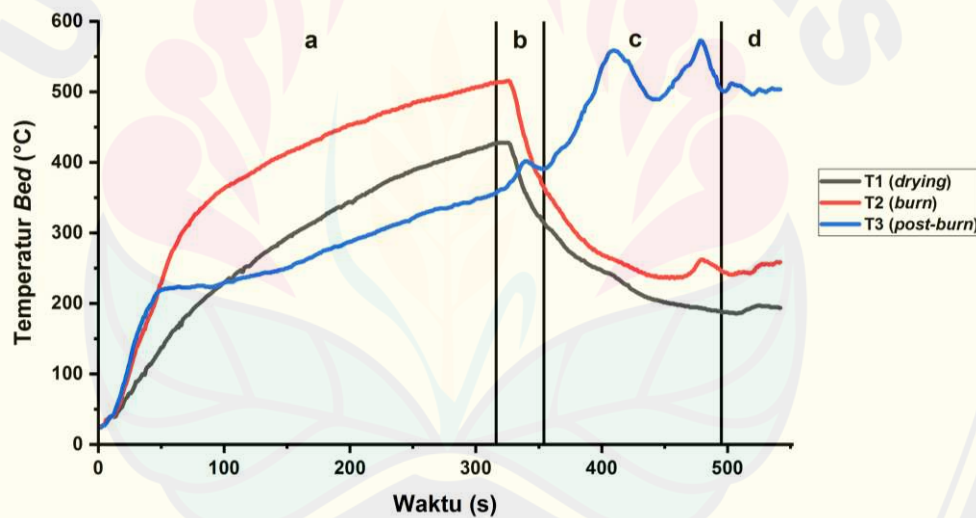
a: Premix starter; b: feed starter; c: homogenizing; d: syngas production

Gambar 4.2 Temperatur *Bed* terhadap *Ignition Time* dengan AFR 17,55:1

Pada Gambar 4.3 dibawah, menunjukkan perubahan temperatur *bed* terhadap *ignition time* pada kondisi AFR 38,30:1 selama proses pembakaran biomassa kulit kopi. Pada tahap *premix starter* yang berlangsung pada detik ke 1 hingga 316, temperatur T_2 (*burn*) mengalami kenaikan paling cepat hingga mencapai sekitar 513°C, sedangkan temperatur T_1 (*drying*) dan T_3 (*post burn*) meningkat secara bertahap hingga masing-masing mencapai sekitar 427°C dan 356°C. Dibandingkan dengan AFR 17,55:1, temperatur T_1 dan T_3 pada kondisi ini meningkat lebih tinggi selama tahap awal, yang menunjukkan bahwa distribusi panas menuju *bed* berlangsung lebih efektif sehingga pemanasan biomassa menjadi lebih merata sebelum proses *feeding* dilakukan. Selanjutnya, pada tahap *feed starter* yang terjadi pada detik ke 317 hingga 354, biomassa mulai dimasukkan ke dalam reaktor sehingga temperatur pada seluruh titik pengukuran mengalami penurunan akibat energi pembakaran digunakan untuk memanaskan biomassa, menguapkan kadar air, dan memulai proses dekomposisi termal.

Tahap *homogenizing* berlangsung pada detik ke 355 hingga 495 dan ditandai dengan peningkatan temperatur T_3 yang sangat signifikan hingga mencapai 573°C, sedangkan temperatur T_1 dan T_2 menurun kemudian stabil pada kisaran 180–260 °C. Peningkatan temperatur T_3 menunjukkan bahwa energi panas

telah berhasil ditransfer ke seluruh *bed*, sehingga zona reaksi bergeser dari area *burning* menuju area pengeringan (*drying*). Fenomena ini mengindikasikan bahwa reaksi oksidasi dan gasifikasi mulai berlangsung secara dominan di dalam *bed*, bukan lagi bergantung pada pembakaran *premix* udara–LPG. Memasuki tahap *syngas production* yang terjadi pada detik ke 497 hingga 542, temperatur T_3 tetap stabil pada kisaran 500°C dengan fluktuasi yang relatif kecil, sedangkan temperatur T_1 dan T_2 juga menunjukkan kondisi yang stabil. Kondisi ini mengindikasikan bahwa reaktor telah mencapai kondisi transisi menuju proses gasifikasi (*starter-off*), sehingga pembentukan *syngas* dapat berlangsung secara berkelanjutan. Kondisi ini menunjukkan bahwa AFR 38,30:1 mampu menghasilkan distribusi panas yang lebih merata dan kestabilan temperatur *bed* yang lebih baik dibandingkan AFR 17,55:1 selama proses pembakaran biomassa.



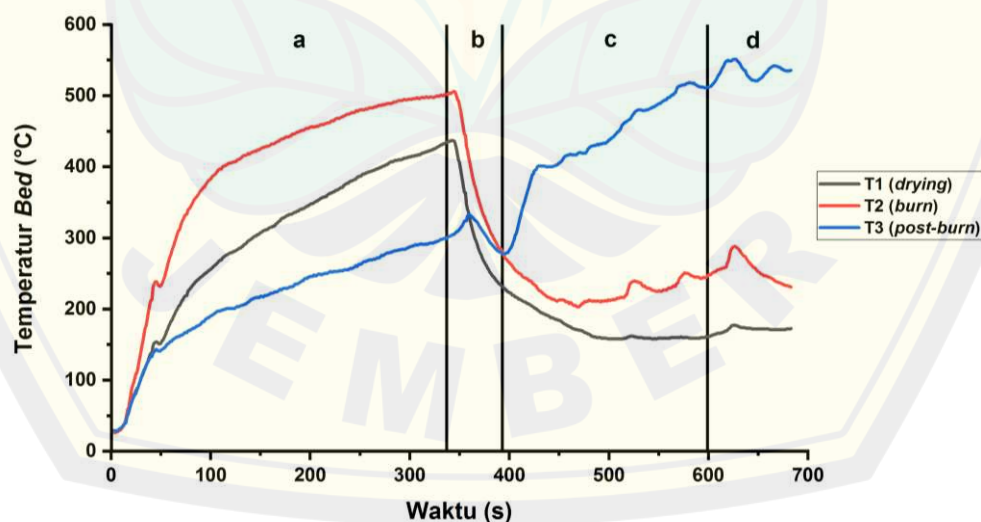
a: Premix starter; b: feed starter; c: homogenizing; d: syngas production

Gambar 4.3 Temperatur *Bed* terhadap Ignition Time dengan AFR 38,30:1

Pada Gambar 4.4 di tahap *premix starter*, temperatur T_3 mengalami kenaikan paling cepat hingga mencapai sekitar 502°C , sedangkan temperatur T_1 dan T_3 meningkat secara bertahap hingga sekitar 440°C dan 330°C . Hal ini menunjukkan bahwa panas hasil pembakaran *premix* udara–LPG masih terpusat di sekitar area *burner* dan secara bertahap menyebar ke seluruh *bed*. Selanjutnya,

pada tahap *feed starter*, biomassa mulai diumpankan ke dalam reaktor sehingga temperatur pada seluruh titik pengukuran mengalami penurunan. Penurunan temperatur ini disebabkan karena energi pembakaran digunakan untuk memanaskan biomassa, menguapkan kadar air, serta memulai proses pirolisis sehingga temperatur *bed* menurun sementara.

Pada tahap *homogenizing* yang terjadi pada detik ke 394 hingga 599, temperatur T_3 meningkat secara signifikan hingga mencapai 518°C , sedangkan temperatur T_1 dan T_2 terus menurun kemudian cenderung stabil. Kondisi ini menunjukkan bahwa panas hasil pembakaran telah terdistribusi ke seluruh *bed* sehingga proses pembakaran dan gasifikasi mulai berlangsung di dalam lapisan biomassa. Selanjutnya, pada tahap *syngas production* yang terjadi pada detik ke 600 hingga 683, temperatur T_3 cenderung stabil pada kisaran $510\text{--}540^{\circ}\text{C}$ dengan fluktuasi yang relatif kecil, sedangkan temperatur T_1 dan T_2 juga menunjukkan kondisi yang stabil. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses gasifikasi telah berlangsung secara berkelanjutan (*starter-off*). Dibandingkan dengan *AFR* 17,55:1 dan *AFR* 38,30:1, kondisi *AFR* 63,83:1 memerlukan waktu *starter* yang lebih lama sebelum mencapai tahap pembentukan *syngas*, meskipun temperatur *bed* yang dihasilkan relatif lebih tinggi dan stabil.

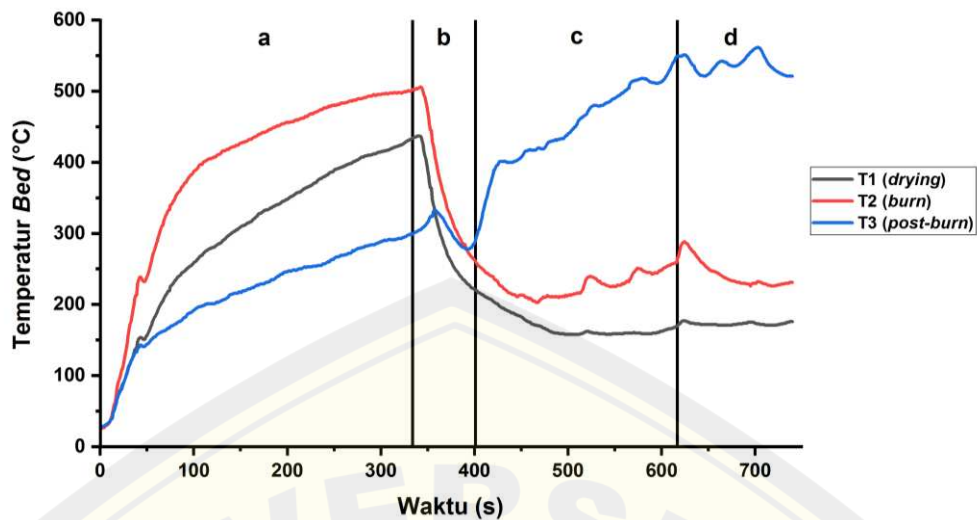


a: *Premix starter*; b: *feed starter*; c: *homogenizing*; d: *syngas production*

Gambar 4.4 Temperatur *Bed* terhadap *Ignition Time* dengan *AFR* 63,83:1

Pada Gambar 4.5, di tahap *premix starter* yang terjadi dari detik ke 1 hingga 334, temperatur T_1 (*drying*) dan T_2 (*burn*) mengalami kenaikan yang cukup cepat hingga mencapai sekitar 434°C dan 502°C, sedangkan temperatur T_3 (*post burn*) meningkat lebih lambat hingga sekitar 300°C. Hal ini menunjukkan bahwa energi hasil pembakaran *premix* udara–LPG masih didominasi pada daerah bawah *bed*, sehingga panas belum terdistribusi secara optimal menuju bagian atas *chamber*. Selanjutnya tahap *feed starter* dari detik ke 335 hingga 401, biomassa mulai dimasukkan ke area *chamber* sehingga temperatur pada ketiga titik *thermocouple* mengalami penurunan akibat energi pembakaran digunakan untuk memanaskan biomassa, menguapkan kadar air, serta memulai proses pirolisis.

Memasuki tahap *homogenizing* dari detik ke 402 hingga 616, temperatur T_3 meningkat secara bertahap hingga mencapai sekitar 500-550°C, sedangkan temperatur T_1 dan T_2 terus menurun dan kemudian stabil pada kisaran 160–250°C. Kondisi ini menunjukkan bahwa panas hasil pembakaran telah terdistribusi secara lebih merata ke seluruh area *bed* sehingga proses pembakaran dan gasifikasi mulai berlangsung secara lebih merata. Pada tahap *syngas production* dari detik ke 617 hingga 740, temperatur T_3 mampu dipertahankan pada 520-550°C dengan fluktuasi yang relatif kecil, sedangkan temperatur T_1 dan T_2 tetap berada pada kondisi yang stabil. Meskipun reaktor akhirnya mampu mencapai kondisi *starter-off*, waktu yang dibutuhkan untuk memasuki tahap *syngas production* lebih lama dibandingkan variasi *AFR* sebelumnya. Hal ini mengindikasikan bahwa pada *AFR* 76,60:1 dengan campuran *premix* yang semakin miskin (*ultra-lean*) menyebabkan intensitas pembakaran awal menurun sehingga proses transfer panas ke biomassa berlangsung lebih lambat dan memperpanjang waktu pembakaran biomassa sebelum proses gasifikasi dapat berlangsung secara mandiri.



a: Premix starter; b: feed starter; c: homogenizing; d: syngas production

Gambar 4.5 Temperatur Bed terhadap Ignition Time dengan AFR 76,60:1

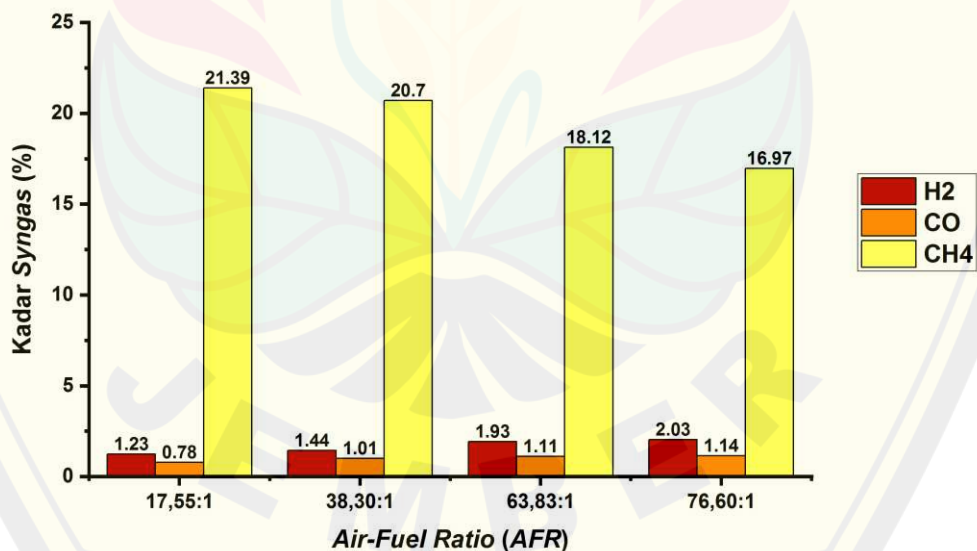
4.1.2 Kadar Syngas

Pengujian kadar *syngas* pada penelitian ini dilakukan menggunakan prinsip pengenceran gas (*gas dilution*). Proses pengenceran dilakukan dengan mencampurkan *syngas* hasil gasifikasi dan udara dari kompresor di dalam *mixing chamber*. Konsentrasi campuran diatur melalui perbandingan debit *syngas* dan udara menggunakan *flowmeter*, sebagaimana ditunjukkan pada desain *mixing chamber* Lampiran B. Pengukuran kadar *syngas* menggunakan sensor semikonduktor *MQ-Series* dimulai setelah *premix* udara-LPG berhasil dinyalakan menggunakan *gas torch*. Selanjutnya, temperatur *bed* dipantau hingga mencapai kondisi stabil pada kisaran ≥ 500 °C setelah biomassa diumpankan sebagai indikator bahwa proses gasifikasi telah berlangsung secara mandiri. Sensor *MQ-Series* yang digunakan terdiri atas MQ-4 untuk mendeteksi gas CH₄, MQ-7 untuk mendeteksi gas CO, dan MQ-8 untuk mendeteksi gas H₂, sesuai dengan spesifikasi yang tercantum pada Lampiran B. Data kadar *syngas* yang diperoleh kemudian digunakan untuk mengevaluasi karakteristik pembentukan *syngas* serta sebagai salah satu parameter penentuan kondisi *starter-off* pada proses *initial ignition* biomassa berdasarkan konsentrasi gas CO dan H₂ yang dihasilkan.

Berdasarkan data pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.6, terlihat bahwa nilai kadar H_2 pada *syngas* yang tertinggi didapat pada variasi *AFR* 76,60:1 dengan kadar sebesar 2,03%, sedangkan kadar H_2 terendah didapat pada variasi *AFR* 17,55:1 dengan kadar sebesar 1,23%. Pada gas CO yang terkandung dalam *syngas*, kadar tertinggi didapat pada variasi *AFR* 76,60:1 dengan kadar sebesar 1,14%, sedangkan kadar CO terendah didapat pada variasi *AFR* 17,55:1 dengan kadar sebesar 0,78%. Pada gas CH_4 yang terkandung dalam *syngas*, kadar tertinggi didapat pada variasi *AFR* 17,55:1 dengan kadar sebesar 21,39%, sedangkan kadar CH_4 terendah didapat pada variasi *AFR* 80:1 dengan kadar sebesar 16,97%.

Tabel 4.2 Data Kadar *Syngas* sebagai Parameter *Starter-off*

No.	<i>Air-Fuel Ratio (AFR)</i>	Kadar <i>Syngas</i> (%)		
		H_2	CO	CH_4
1.	17,55:1	1,23	0,78	21,39
2.	38,30:1	1,44	1,01	20,70
3.	63,83:1	1,93	1,11	18,12
4.	76,60:1	2,03	1,14	16,97



Gambar 4.6 Kadar *Syngas* terhadap Variasi *Air-Fuel Ratio*

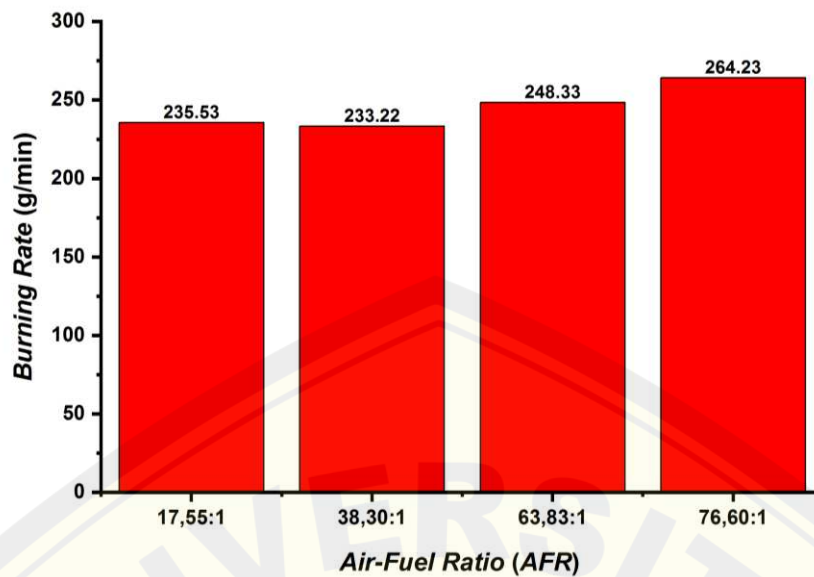
4.1.3 *Burning Rate*

Laju pembakaran biomassa (*burning rate*) dihitung berdasarkan laju biomassa yang diproses dalam setiap interval waktu pengamatan dan dinyatakan dalam satuan gram per menit (g/min). Data *burning rate* selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi *Air-Fuel Ratio* (*AFR*) terhadap laju pembakaran biomassa selama proses *initial ignition*, serta dikaitkan dengan kenaikan temperatur *bed* gasifikasi dan pembentukan *syngas* hingga proses gasifikasi dapat berlangsung secara mandiri (*starter-off*).

Berdasarkan Tabel 4.3 dan Gambar 4.7, nilai *burning rate* yang diperoleh menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya *AFR*, yaitu 235,53 g/min pada *AFR* 17,55:1, 233,22 g/min pada *AFR* 38,30:1, 248,33 g/min pada *AFR* 63,83:1, dan mencapai nilai tertinggi sebesar 264,23 g/min pada *AFR* 76,60:1. Meskipun pada *AFR* 38,30:1 terjadi sedikit penurunan dibandingkan *AFR* 17,55:1, perbedaannya relatif kecil sehingga secara umum peningkatan *AFR* menghasilkan laju pembakaran yang semakin besar. Kondisi tersebut juga sejalan dengan kenaikan temperatur *bed* yang diperoleh selama pengujian, dimana peningkatan *burning rate* berkontribusi terhadap pelepasan energi panas yang lebih besar sehingga mampu mempertahankan temperatur *bed* pada kondisi yang mendukung transisi menuju proses gasifikasi dan pembentukan *syngas*.

Tabel 4.3 Data *Burning Rate* pada Proses Pembakaran Biomassa

No.	<i>Air-Fuel Ratio</i> (<i>AFR</i>)	Massa Biomassa (g)	Waktu (min)	<i>Burning Rate</i> (g/min)
1.	17,55:1	1962	8,83	235,53
2.	38,30:1	2106	9,03	233,22
3.	63,83:1	2826	11,38	248,33
4.	76,60:1	3258	12,33	264,23



Gambar 4.7 Analisis *Burning Rate* terhadap Variasi *Air-Fuel Ratio*

4.2 Pembahasan

4.1.1 Temperatur *Bed* Gasifikasi

Berdasarkan Gambar 4.2 hingga Gambar 4.5, variasi *Air-Fuel Ratio* (AFR) pada sistem *starter premix* udara-LPG memengaruhi dinamika temperatur *bed* selama proses *initial ignition* biomassa kulit kopi. Seluruh variasi AFR menunjukkan pola perubahan temperatur yang relatif sama, yaitu meningkat selama tahap *premix starter*, menurun sesaat setelah biomassa diumpankan (*feed starter*), kemudian meningkat kembali pada tahap *homogenizing* hingga mencapai kondisi relatif stabil pada fase *syngas production*. Perbedaannya terletak pada laju kenaikan temperatur dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi stabil. AFR 17,55:1 mampu mencapai fase *syngas production* lebih cepat dibandingkan AFR 38,30:1, 63,83:1, dan 76,60:1, sehingga menunjukkan bahwa perubahan AFR berpengaruh terhadap dinamika pembakaran biomassa. Fenomena tersebut sesuai dengan penelitian Baron et al. (2018) yang menyatakan bahwa: “Pembakaran *premix gas* di dalam reaktor *fluidized bed* akan terbentuk suatu zona temperatur maksimum di area *bed* yang dipengaruhi oleh *ignition time* campuran bahan bakar dan udara”. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan AFR memengaruhi

karakteristik pembakaran *starter premix*, sehingga turut menentukan perubahan temperatur *bed* pada tahap awal penyalaan biomassa.

Setelah biomassa diumpankan, temperatur *bed* mengalami penurunan sementara sebelum kembali meningkat pada tahap *homogenizing*. Penurunan temperatur ini mengindikasikan bahwa sebagian energi hasil pembakaran awal mulai dimanfaatkan untuk memanaskan biomassa sehingga proses konversi termokimia dapat berlangsung. Seiring meningkatnya temperatur *bed*, reaksi pembakaran dan gasifikasi berlangsung lebih cepat hingga memasuki fase *syngas production*. Penelitian Fierro et al. (2023) menjelaskan bahwa: “perubahan komposisi campuran bahan bakar–udara pada sistem *premixed combustion* memengaruhi karakteristik pembakaran dan energi yang dilepaskan dari nyala api”.

4.1.2 Kadar Syngas

Berdasarkan Tabel 4.2 Gambar 4.6 terlihat bahwa variasi *Air-Fuel Ratio* (*AFR*) pada sistem *starter premix* udara–LPG menyebabkan perubahan pada kadar *syngas* yang dihasilkan saat kondisi *starter-off*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar CH_4 merupakan komponen *syngas* terbesar pada seluruh variasi *AFR*, yaitu berkisar antara 16,97–21,39%, sedangkan kadar H_2 dan CO relatif lebih rendah, masing-masing berkisar 1,23–2,03% dan 0,78–1,14%. Seiring meningkatnya *AFR*, kadar CH_4 mengalami penurunan secara bertahap, sementara kadar H_2 dan CO menunjukkan kecenderungan meningkat. Perubahan komposisi tersebut menunjukkan bahwa variasi *AFR* memengaruhi proses pembentukan *syngas* selama fase *starter-off*, meskipun karakteristik gas yang dihasilkan masih didominasi oleh metana (CH_4).

Perubahan kadar *syngas* tersebut berkaitan dengan karakteristik temperatur *bed* yang telah dibahas pada subbab sebelumnya. Berdasarkan hasil pengukuran temperatur ditunjukkan bahwa peningkatan *AFR* menghasilkan nilai perbedaan temperatur pada *bed* yang semakin besar. Meskipun demikian, temperatur proses gasifikasi pada penelitian ini hanya berada pada kisaran 300–400°C, sehingga proses gasifikasi yang berlangsung belum cukup tinggi untuk

menggeser komposisi *syngas* agar didominasi oleh CO dan H₂. Pada rentang temperatur tersebut, pembentukan CH₄ masih relatif dominan, sedangkan peningkatan temperatur terutama berpengaruh terhadap mulai meningkatnya kadar CO dan H₂ akibat semakin aktifnya reaksi konversi biomassa. Penelitian Kayiba (2022) menjelaskan bahwa: “Peningkatan temperatur gasifikasi menyebabkan perubahan komposisi *syngas*, dimana pembentukan CO dan H₂ cenderung meningkat, sedangkan pada temperatur yang lebih rendah kandungan CH₄ masih relatif dominan”.

4.1.3 *Burning Rate*

Berdasarkan Tabel 4.3 dan Gambar 4.7, nilai *burning rate* rata-rata meningkat seiring bertambahnya *AFR*, yaitu dari 235,53 g/min pada *AFR* 17,55:1 menjadi 264,23 g/min pada *AFR* 76,60:1. Peningkatan *burning rate* menunjukkan bahwa semakin besar *AFR* yang digunakan, semakin besar pula laju pembakaran biomassa selama proses pembakaran awal. Kondisi ini mengindikasikan bahwa peningkatan suplai udara pada campuran *premix* menghasilkan pembakaran yang lebih cepat sehingga biomassa lebih cepat mengalami dekomposisi dan konversi termal.

Selain itu, peningkatan *burning rate* juga sejalan dengan kenaikan temperatur *bed* dan kadar *syngas*. Semakin besar *burning rate*, semakin besar energi panas yang dilepaskan selama proses pembakaran sehingga menghasilkan nilai perbedaan temperatur pada *bed* yang lebih tinggi dan distribusi panas yang lebih merata. Kondisi tersebut mempercepat pemanasan biomassa dan mendukung berlangsungnya reaksi gasifikasi, yang ditunjukkan dengan meningkatnya kadar CO dan H₂ serta menurunnya kadar CH₄ pada variasi *AFR* yang lebih tinggi. Penelitian oleh Deng et al. (2022) mengatakan bahwa: “Peningkatan kandungan oksigen pada udara pembakaran menyebabkan *burning rate* semakin meningkat karena intensitas reaksi pembakaran menjadi lebih tinggi dan pelepasan panas berlangsung lebih cepat”.