KEGIATAN 3

1. JUDUL

Pengujian Performa Kompor Gasifikasi Biomassa

2. *LATAR BELAKANG*

Sektor rumah tangga merupakan pemakai energi terbesar setelah sektor industri. Konsumsi energi untuk sektor rumah tangga di Indonesia mencapai 315 juta setara barel minyak (SBM) dan 75% energi yang terkonsumsi pada tahun 2009 bersumber dari biomassa [Sutijastoto. *2010*]. Memasak termasuk kegiatan domestik yang sumber energinya didominasi *Liquid Petroleum Gas* (LPG) dan minyak tanah yang merupakan sumber energi tidak terbarukan dan distribusinya masih belum merata khususnya di daerah pedesaan. Akibatnya, pemenuhan energi sektor domestik cenderung menggunakan biomassa berupa kayu dengan pembakaran pada kompor tradisional. Kompor tradisional ini boros bahan bakar serta menimbulkan asap yang berbahaya bagi kesehatan. Sehingga, diperlukan teknologi pemanfaatan biomassa untuk keperluan memasak yang hemat bahan bakar dan ramah lingkungan.

Kompor gasifikasi merupakan teknologi pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar dengan menkonversinya menjadi gas yang mudah terbakar yang selanjutnya dikonversi menjadi energi kalor. Efisiensi termal kompor gasifikasi dua kali lebih besar dibanding efisiensi termal kompor tradisional yang hanya mencapai 5 – 15% [Bhattacharya and Leon. 2010]. Selain itu, pembakaran biomassa pada kompor gasifikasi menghasilkan lebih sedikit asap sehingga lebih ramah lingkungan.

Kemampuan kompor gasifikasi untuk menghasilkan efisiensi termal yang tinggi bergantung pada disain kompor gasifikasi, seperti tipe kompor, dimensi kompor, laju alir udara gasifikasi dan laju alir udara pembakaran [Mukunda *et al.* 2010]. Optimalisasi disain kompor gasifikasi dapat menghasilkan tingkat emisi yang rendah dengan nyala api hampir menyerupai nyala api pada kompor LPG [Belonio 2005]. Keutamaan kompor gasifikasi adalah bahan bakarnya mudah didapat serta lebih murah dibandingkan bahan bakar lain. Sehingga kompor

gasifikasi dapat dijadikan salah satu teknologi pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi untuk memasak yang hemat energi dan ramah lingkungan.

3. TUJUAN

Penelitian ini secara umum bertujuan untuk mempelajari gasifikasi yang terjadi pada kompor. Adapun tujuan khusus dari penelitian ini, yaitu mempelajari pengaruh dimensi ruang bakar kompor, jenis biomassa terhadap kinerja kompor gasifikasi force draft dan natural draft

4. LUARAN

1. Informasi tentang kinerja kompor gasifikasi force draft dan natural draft menggunakan berbagai jenis biomassa.
2. Kompor gasifikasi yang akan diterapkan dalam kehidupan masyarakat.
3. Artikel ilmiah yang akan diterbitkan pada jurnal nasional.
4. Laporan penelitian.

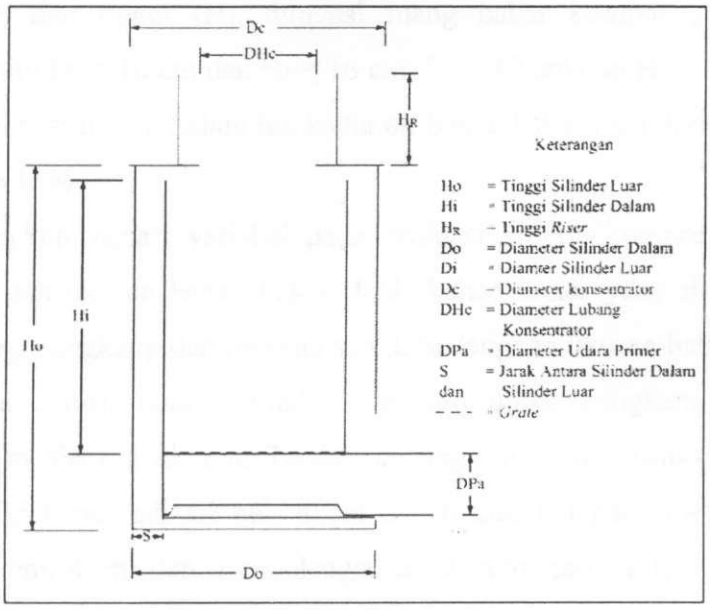
5. METODE

5.1 Bahan dan Alat

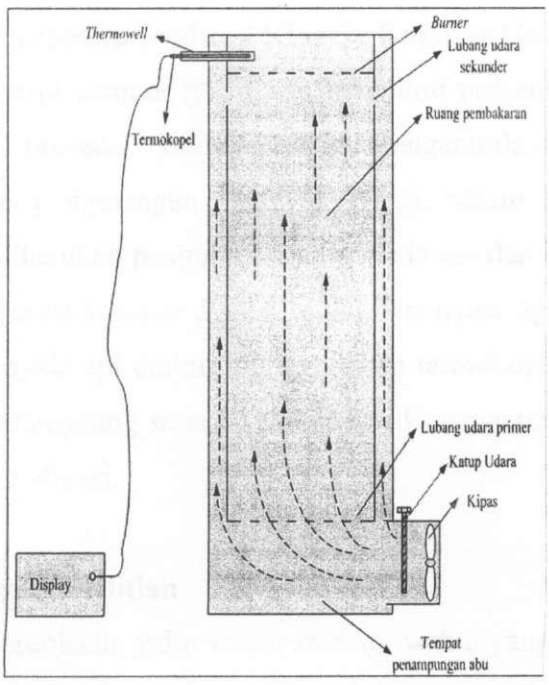
Bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini adalah ranting kayu akasia, tandan kosong, cangkang dan potongan pelepah sawit. Biomassa tersebut dipilih karena mudah didapatkan serta ketersediaannya melimpah, terutama di daerah Riau. Bahan bakar yang digunakan dikecilkan ukurannya sesuai kebutuhan selanjutnya dikeringkan di bawah sinar matahari untuk mengurangi kadar airnya hingga mencapai kadar air yang ditentukan dan disimpan di dalam kantong plastik untuk menghindari perubahan kadar air. Prosedur pengujian kadar air biomassa mengikuti SNI 08-7070-2005.

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari dua jenis kompor yaitu kompor *forced draft* dan kompor PP-Plus *natural draft*. Kompor gasifikasi *forced draft* terdiri atas tiga variasi berdasarkan dimensinya. Kompor *forced draft* dengan aliran udara bersumber dari *fan* berarus 0.12 Ampere dan tegangan 12 Volt. Sedangkan dimensi kompor gasifikasi PP-Plus mengikuti rancangan yang didisain Anderson dan Wendelbo [2009] dengan dimensi, yaitu diameter silinder

luar 20 cm dan tinggi 30 cm sedangkan diameter silinder dalam 15 cm dan tinggi 25 cm. Rangkaian kompor gasifikasi *natural draft* dapat dilihat pada Gambar 5.1. Sedangkan untuk kompor *forced draft* dapat dilihat pada Gambar 5.2.



Gambar 5.1. Rangkaian alat kompor gasifikasi PP-Plus *natural draft*



Gambar 5.2. Rangkaian kompor gasifikasi *forced draft*

5.2. Variabel Penelitian

Variasi variabel pada evaluasi kinerja kompor gasifikasi *forced draft* adalah dimensi ruang bakar dan kadar air biomassa. Dimensi tersebut meliputi diameter (D) dan tinggi (H), dimensi ruang bakar kompor gasifikasi yang digunakan yaitu D_1 = 10 cm dan H_1 = 16 cm, D_2 = 12 cm dan H_2 = 16 cm serta D_3 = 12 cm dan H_3 = 20 cm. Selain itu, kadar air bakan bakar juga divariasikan, yaitu 7%, 10% dan 13%.

Sedangkan variasi variabel pada evaluasi kinerja kompor natural draft adalah jenis dan ukuran bahan bakar. Jenis bahan bakar yang digunakan yaitu tandan kosong, cangkang dan pelepah sawit. Sedangkan ukuran bahan bakar pada penelitian ini divariasikan menjadi 3, namun untuk cangkang sawit hanya divariasikan menjadi 2 ukuran. Tandan kosong sawit divariasikan berdasarkan potongan spiklet menjadi ±2 cm, 4 cm dan 6 cm. Pelepah sawit divariasikan menjadi ± 2 cm, 4 cm dan 6 cm dengan tebal potongan ±1-1.5 cm. Cangkang sawit divariasikan dengan ukuran <0.5 cm dan 0.5-1 cm.

5.3. Prosedur Percobaan Evaluasi Kinerja Kompor Gasifikasi

Evaluasi kinerja kompor gasifikasi mengikuti prosedur *water boiling test* (WBT) mengikuti prosedur Bailis [2007]. Pengambilan data untuk setiap pengujian dilakukan pengulangan sebanyak 3 kali. Selain prosedur WBT, pada penelitian ini juga dilakukan pengukuran suhu nyala api dan lama operasi kompor gasifikasi. Lama operasi kompor dicatat mulai dari nyala api stabil hingga nyala api berhenti. Suhu nyala api diukur menggunakan termokopel dan dicatat selama proses gasifikasi berlangsung setiap 1 menit untuk mengetahui profil suhu nyala api selama proses gasifikasi.

5.4. Analisa Hasil Penelitian

Data hasil percobaan, yaitu waktu *startup*, waktu yang dibutuhkan kompor untuk mendidihkan air, lama proses gasifikasi berlangsung, berat bahan bakar dan bahan sisa pembakaran, suhu nyala api kompor gasifikasi dan suhu air di dalam panci. Kinerja kompor gasifikasi dapat dilihat dari laju pembakaran, konsumsi bahan bakar spesifik, *fire power* dan efisiensi termal.

Penelitian unjuk kerja kompor gasifikasi PP-Plus (natural draft) dan force draft dilakukan secara *batch.* Alat-alat yang akan digunakan dalam penelitian ini yaitu kompor gasifikasi PP-Plus sebagai tempat terjadinya reaksi gasifikasi, dilengkapi dengan termokopel untuk mengukur suhu pada kompor gasifikasi. Bejana alumunium silinder digunakan sebagai wadah *water boiling test.*

Analisa Hasil Penelitian

Unjuk kerja kompor gasifikasi mengikuti prosedur *water boiling test* (WBT) yang dilakukan Bailis [2007]. Waktu *start-up*, waktu yang dibutuhkan kompor untuk mendidihkan air, lama proses gasifikasi berlangsung, berat bahan bakar dan bahan sisa pembakaran, suhu nyala api kompor gasifikasi dan suhu air di dalam bejana alumunium silinder merupakan data yang akan diambil dari percobaan.

6. HASIL DAN PEMBAHASAN

6.1 Densitas unggun Bahan Bakar

Pada penelitian kompor gasifikasi biomassa ini digunakan bahan bakar berupa ranting kayu akasia yang divariasikan kadar airnya, serta biomassa limbah sawit seperti tandang kosong, cangkang dan pelepah sawit yang divariasikan ukurannya. Pada tahap preparasi bahan baku, biomassa yang telah dipotong-potong dikeringkan dengan memanfaatkan panas sinar matahari. Selanjutnya dianalisa kadar air serta densitas unggun bahan bakar. Kadar air biomassa berpengaruh terhadap densitas unggun bahan bakar. Semakin besar kadar air yang terdapat pada bahan bakar maka akan semakin besar pula densitas unggun bahan bakar pada kompor. Variasi kadar air biomassa hanya dilakukan untuk kompor dengan dimensi tinggi 16 cm dan diameter 12 cm. Pada perbedaan kadar air biomassa, nilai densitas unggun terbesar didapat dari biomassa dengan kadar air 12.58% yaitu 0.281 gram/cm^3 dan nilai densitas unggun terkecil didapat dari biomassa dengan kadar air 7.26% yaitu 0.249 gram/cm^3. Sedangkan densitas unggun untuk ranting kayu akasia dengan kadar air berbeda pada beberapa kompor gasifikasi dapat dilihat pada Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Densitas unggun bahan bakar kompor gasifikasi

No.	Kompor	Kadar Air	Densitas Unggun (gram/cm^3)
1	Kompor 1 (H = 16 cm; D = 10 cm)	12.38%	0.292
2	Kompor 2 (H = 16 cm; D = 12 cm)	12.58%	0.281
3	Kompor 3 (H = 20 cm; D = 12 cm)	12.76%	0.289
4	Kompor 2 (H = 16 cm; D = 12 cm)	9.63%	0.260
5	Kompor 2 (H = 16 cm; D = 12 cm)	7.26%	0.249

Penggunaan variasi bahan bakar biomassa limbah sawit meliputi ukuran maksimal cangkang sawit umumnya hanya ± 1 cm dengan densitas unggun mencapai 0.39-0.5 gram/cm^3. Pada penelitian ini variasi 3 ukuran tidak dilakukan karena pada dasarnya bahan bakar cangkang sawit sangat sulit untuk dinyalakan. Oleh sebab itu variasi ukuran cangkang hanya untuk ukuran <0.5 cm dan 0.5-1 cm. Cangkang dengan ukuran <0.5 cm menghasilkan densitas unggun sekitar 0.4 gram/cm^3, namun dengan ukuran ini kompor PP-Plus tidak dapat dioperasikan. Kecilnya porositas pada unggun cangkang ukuran <0.5 cm sangat menyulitkan udara primer melewati unggun sehingga gasifikasi tidak terjadi. Selain itu tinggi unggun cangkang pada kompor tidak bisa diisi penuh karena tinggi unggun semakin memperbesar resistansi terhadap aliran udara primer.

Pada penelitian ini tinggi unggun untuk cangkang sawit berukuran 0.5-1 cm adalah 11 cm dengan densitas unggun 0.39 gram/cm^3. Sedangkan untuk cangkang dengan ukuran <0.5 cm tidak dilakukan analisa WBT karena cangkang sangat sulit dinyalakan dengan ukuran kecil walaupun tinggi unggunnya rendah. Dengan densitas unggun 0.5 gram/cm^3, cangkang dengan ukuran <0.5 cm hanya bisa menyala dengan tinggi unggun 6 cm. Sedangkan pada penelitian Ariho dkk [2011] kompor PP-Plus mampu beroperasi dengan densitas unggun bahan bakar lebih dari 0.5 gram/cm^3. Namun pada penelitian Ariho dkk [2011] tidak dilaporkan proses *startup* kompor.

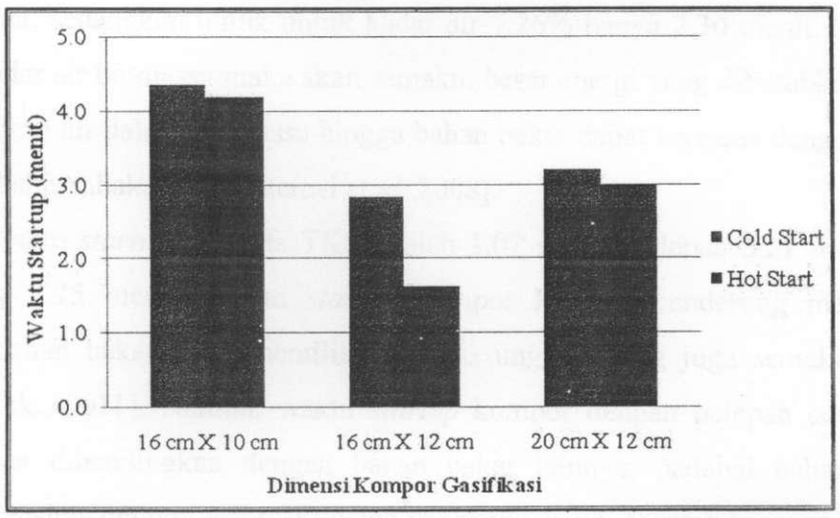
Pelepah sawit dan TKS dioperasikan pada kompor PP-Plus dengan tinggi unggun 19 cm atau 2 cm lebih rendah dari tinggi ruang bakar. Variasi pelepah sawit dengan ukuran potongan 2 cm, 4 cm dan 6 cm menghasilkan densitas

unggun masing-masing 0.280 gr/cm^3, 0.250 gr/cm^3 dan 0.225 gr/cm^3. Sedangkan variasi TKS berukuran 2 cm, 4 cm dan 6 cm memiliki densitas unggun 0.98 gr/cm^3, 0.88 gr/cm^3 dan 0.78 gr/cm^3.

6.2 Waktu *Startup*

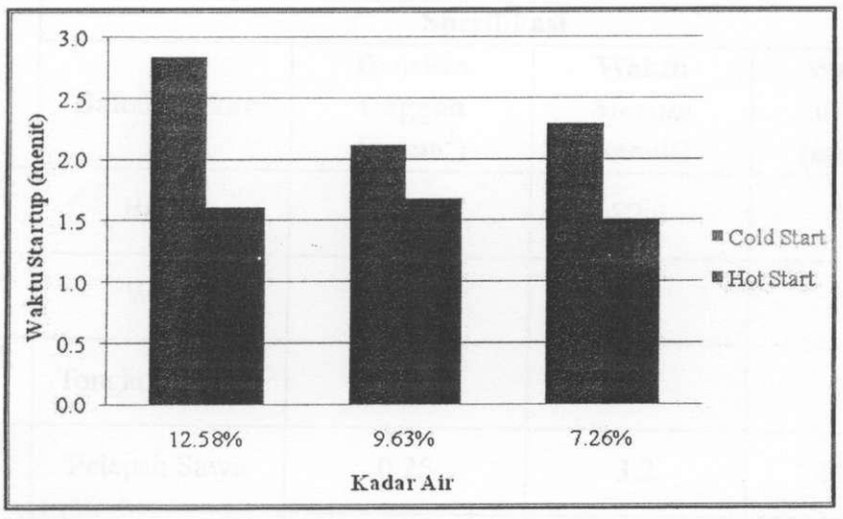
Proses *startup* kompor gasifikasi biomassa dilakukan dengan pemantik api, 20 gram serpihan kayu serta ±5 ml minyak tanah sebagai bahan bakar pemicu. Pada proses *startup* kompor gasifikasi, nyala api yang terbentuk berasal dari pembakaran biomassa secara langsung dan masih menghasilkan sedikit asap. Ketika nyala api kompor mulai konstan dan tidak menghasilkan asap maka gasifikasi dapat dikatakan telah berlangsung pada kompor. Penentuan akhir proses *startup* dan mulai terjadi gasifikasi hanya dilakukan secara visual dengan melihat sumber nyala api pada kompor. Proses gasifikasi ditandai dengan biomassa mulai menjadi bara dan menghasilkan asap di dalam kompor yang kemudian secara langsung bereaksi dengan udara sekunder dari bagian atas kompor membentuk nyala api.

Waktu *startup* kompor gasifikasi dapat dipengaruhi diameter ruang bakar kompor gasifikasi. Diameter besar menghasilkan luas areal pembakaran yang besar pula sehingga semakin banyak biomassa dapat terbakar pada waktu bersamaan, sehingga akan semakin banyak energi yang dapat dihasilkan untuk memicu terjadinya proses gasifikasi. Pengaruh dimensi kompor terhadap waktu *startup* dapat dilihat pada Gambar 6.1. Selain dimensi ruang bakar kompor, densitas unggun serta kadar air bahan bakar berpengaruh terhadap waktu *startup* kompor. Sehingga semakin kecil kadar air maka semakin singkat waktu *startup*. Pengaruh kadar air biomassa terhadap waktu *startup* dapat dilihat pada Gambar 6.2.



Gambar 6.1 Pengaruh dimensi kompor terhadap waktu *startup*

Kompor gasifikasi dengan diameter 10 cm membutuhkan waktu *startup* lebih lama yaitu mencapai 4.36 menit jika dibandingkan dengan kompor berdiameter 12 cm yang hanya 2.84 menit, sedangkan tinggi dari ruang bakar kompor tidak terlalu berpengaruh terhadap waktu *startup* kompor. Proses *startup* kompor gasifikasi pada fase *hot start* dapat lebih cepat jika dibandingkan dengan fase *cold start*, karena kondisi kompor yang masih panas pada fase *hot start* membantu proses pengeringan bahan sehingga dapat lebih mudah terbakar.



Gambar 6.2 Pengaruh kadar air biomassa terhadap waktu *startup*

Bahan bakar dengan kadar air 12.58% lebih sulit untuk dinyalakan jika dibandingkan dengan bahan bakar berkadar air 7.26%. Waktu *startup* yang dibutuhkan untuk kompor dengan bahan bakar berkadar air 12.58% mencapai

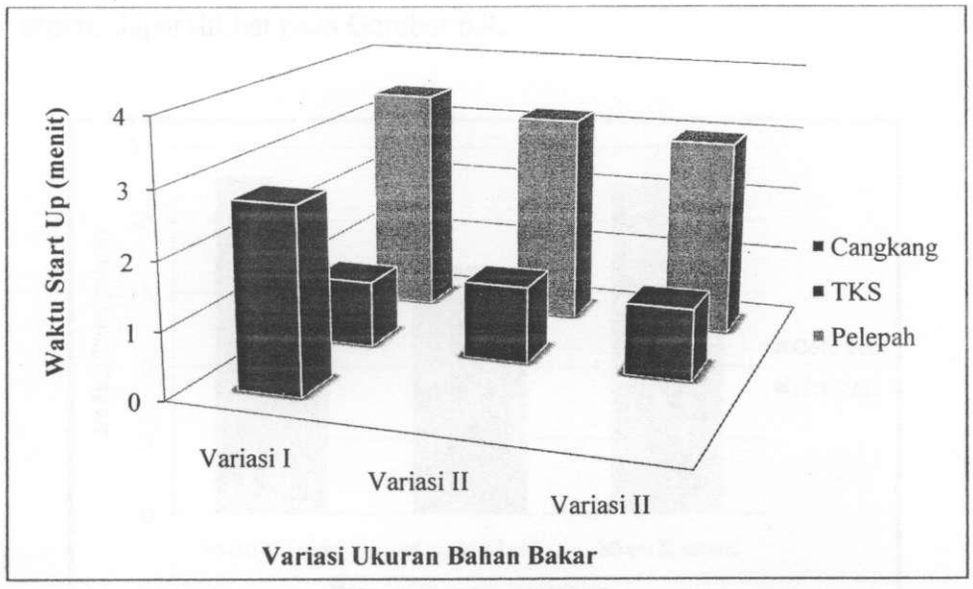
2.84 menit, sedangkan untuk untuk kadar air 7.26% hanya 2.30 menit. Semakin tinggi kadar air biomassa maka akan semakin besar energi yang dibutuhkan untuk menguapkan air dalam biomassa hingga bahan bakar dapat bereaksi dengan udara pada reaksi pembakaran [Yuntenwi *et al.* 2008].

Waktu *startup* rata-rata TKS adalah 1.07 menit, pelepah 3.21 menit dan cangkang 2.75 menit. Waktu *startup* kompor PP-Plus cenderung meningkat dengan bahan bakar yang memiliki densitas unggun yang juga semakin besar [Ariho dkk., 2011]. Namun, waktu *startup* kompor dengan pelepah cenderung lebih lama dibandingkan dengan bahan bakar lainnya, padahal bahan bakar dengan densitas unggun terbesar adalah cangkang sawit. *Startup* kompor PP-Plus dengan cangkang sawit cenderung sulit digunakan pada penelitian ini sehingga tinggi unggun cangkang yang dipakai dikurangi 8 cm menjadi 11 cm. Penggunaan cangkang dengan tinggi unggun yang sama dengan bahan bakar lainnya membutuhkan waktu *startup* 15 hingga 20 menit. Namun, nyala gas yang dihasilkan tidak konstan dan tidak berlangsung lama. Selain itu *startup* juga harus dibantu dengan sedikit pengadukan bahan bakar pada bagian atas. Tabel 6.2 menampilkan perbandingan waktu *startup* kompor PP-Plus dengan beberapa bahan bakar.

Tabel 6.2 Waktu *Startup* dan Waktu didih kompor PP-Plus

Peneliti	**Spesifikasi**			
	Bahan Bakar	**Densitas Unggun (gr/cm^3)**	**Waktu *Startup* (menit)**	**Waktu didih (menit)**
Ariho, dkk [2010]	Briket	0.56	22.5	23
Ariho, dkk [2010]	Wood	0.27	2.2	10
Ariho, dkk [2010]	Tongkol Jagung	0.175	2.5	17
Penelitian ini	Pelepah Sawit	0.25	3.2	14.6
Penelitian ini	TKS	0.1	1	9.3
Penelitian ini	Cangkang Sawit	0.39	2.75	17.9

Waktu *startup* pada penelitian ini dan Ariho, dkk [2010] cenderung meningkat dengan densitas unggun yang semakin besar. Namun, jenis bahan bakar juga ikut mempengaruhi waktu *startup*. Penelitian Ariho, dkk [2010] menggunakan tongkol jagung dengan densitas unggun 0.175 gr/cm3 menghasilkan waktu *startup* 2.5 menit, sedangkan wood dengan densitas unggun 0.27 gr/cm3 menghasilkan waktu *startup* 2.2 menit. Sementara itu variasi ukuran masing-masing bahan bakar pada penelitian ini juga tidak menghasilan perbedaan waktu *startup* yang besar seperti yang terlihat pada Gambar 6.3. Waktu *startup* untuk variasi ukuran TKS adalah 1 hingga 1.15 menit, sedangkan pelepah sawit 2.98 hingga 3.45 menit. Bahan bakar cangkang membutuhkan waktu 2.75 menit untuk proses *startup*.

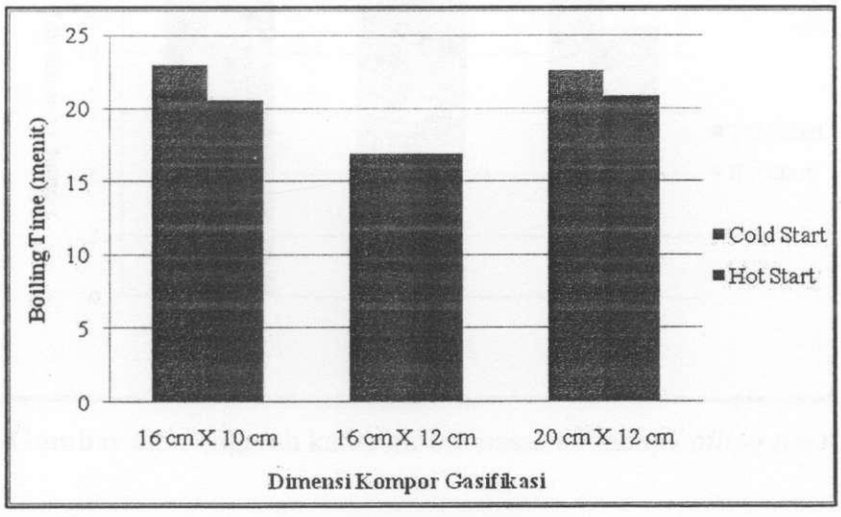


Gambar 6.3 Pengaruh Variasi Ukuran Bahan Bakar terhadap Waktu *Startup*

Variasi ukuran terhadap waktu *startup* hanya terlihat pada pelepah dan TKS. Waktu *startup* pada TKS semakin bertambah dengan densitas unggun yang semakin kecil, sedangkan dengan pelepah waktu *startup* semakin berkurang pada densitas unggun yang semakin kecil. Pada penggunaan TKS dengan ukuran potongan 6 cm sebagian besar bahan bakar terbakar secara langsung karena densitas unggun yang kecil menyebabkan pembakaran mendekati sempurna. Sehingga untuk mendapatkan bahan bakar mengalami gasifikasi semakin lama meskipun nyala api yang dihasilkan cukup besar.

6.3 Waktu didih

Boiling time merupakan parameter dalam WBT yang menunjukkan seberapa lama waktu yang dibutuhkan kompor untuk mendidihkan 2.5 liter air. Rata-rata *boiling time* pada penelitian ini adalah 18.13 menit dengan rentang *boiling time* dari 13.31 menit sampai dengan 22.96 menit. Kemampuan kompor gasifikasi *forced draft* pada penelitan ini tidak jauh berbeda jika dibanding kompor *turbo stove* [Reed *et al.* 2000] dengan diameter 10 cm dan tinggi 10 cm yang mampu mendidihkan 1 liter air dalam waktu 6 menit. Dimensi yang paling berpengaruh terhadap *boiling time* yaitu diameter. Semakin besar diameter ruang bakar kompor maka semakin besar energi yang dapat dihasilkan kompor. Sedangkan tinggi kompor gasifikasi tidak terlalu berpengaruh terhadap *boiling time* seperti dapat dilihat pada Gambar 6.4.

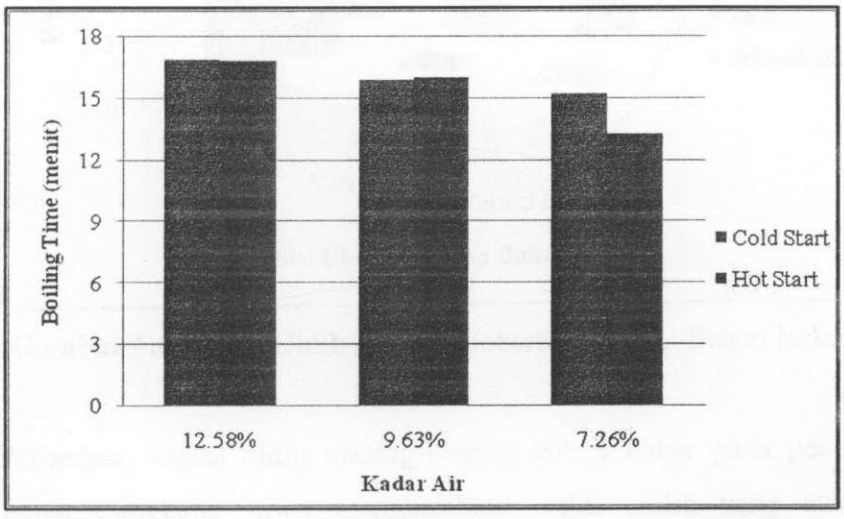


Gambar 6.4 Pengaruh dimensi kompor terhadap *boiling time*

Kemampuan kompor untuk mendidihkan air juga dipengaruhi kadar air biomassa yang digunakan sebagai bahan bakar. Semakin tinggi kadar air biomassa berdampak terhadap semakin lama *boiling time* seperti dapat dilihat pada Gambar 6.5. Sedangkan kecenderungan kinerja kompor pada fase *cold start* dan fase *hot start* menunjukkan kinerja kompor pada fase *hot start* dapat mendidihkan air lebih cepat. Kondisi kompor yang masih panas pada fase *hot start* dapat mengurangi

jumlah transfer panas dari bahan bakar ke kompor, sehingga lebih banyak energi yang dapat digunakan untuk mendidihkan air.

Kompor dengan diameter 10 cm membutuhkan waktu 22.96 menit untuk mendidihkan 2.5 liter air. Sedangkan kompor dengan diameter lebih besar yaitu 12 cm mampu mendidihkan air dalam waktu 16.91 menit. Pengaruh tinggi kompor terhadap *boiling time* dapat dilihat dari kompor dengan tinggi 20 cm yang hanya mampu mendidihkan air dalam waktu 22.62 menit dan lebih lama jika dibandingkan kompor dengan tinggi 16 cm. Semakin tinggi kompor gasifikasi maka kecepatan *superficial* udara primer akan semakin kecil akibat resistansi unggun bahan bakar, sehingga gas yang dapat terbentuk akan semakin sedikit dan berdampak pada energi yang dihasilkan kompor [Reed *et al.* 1996].

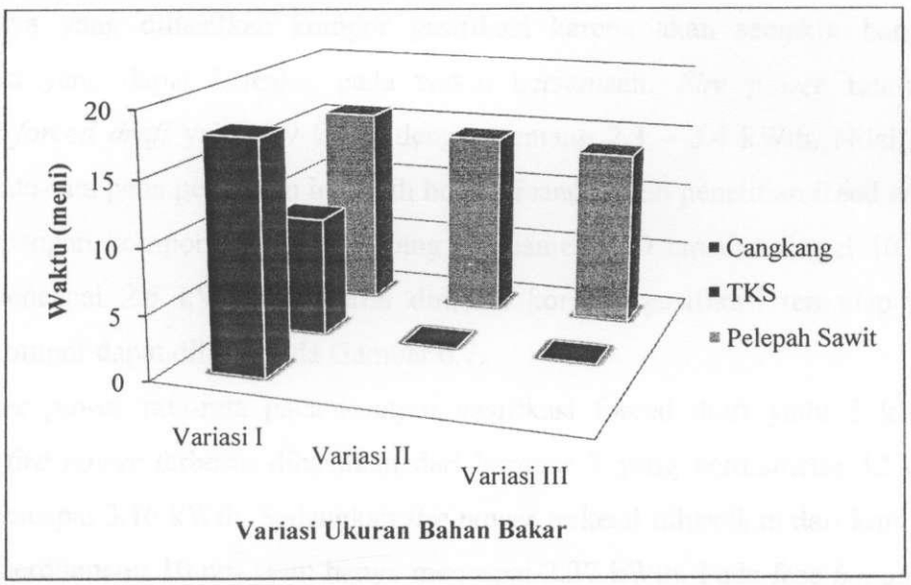


Gambar 6.5 Pengaruh kadar air biomassa terhadap *boiling time*

Kompor dengan bahan bakar berkadar air 7.26% menghasilkan *boiling time* terkecil yaitu 15.27 menit sedangkan untuk kompor dengan bahan bakar berkadar air 12.58% mampu mendidihkan air dalam 16.91 menit. Kompor dengan kadar air bahan bakar yang tinggi akan membutuhkan semakin lebih banyak energi untuk menguapkan air pada bahan bakar sebelum akhirnya bereaksi dengan udara [Yuntenwi *et al.* 2008]. Sehingga semakin besar kadar air bahan bakar maka akan semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk mendidihkan 2.5 liter air.

Rata-rata waktu didih pada kompor PP-Plus dengan bahan bakar biomassa limbah sawit adalah 14.75 menit dengan rentang waktu dari 9.33 hingga 18.37

menit. Waktu didih tersingkat penelitian ini didapat dengan bahan bakar TKS ukuran potongan 2 cm pada fase *hot start*. Sedangkan cangkang berukuran 0.5-1 cm merupakan sampel dengan waktu didih terlama. Analisa WBT dengan bahan bakar TKS umumnya tidak dapat mendidihkan air, kecuali fase *hot start* dengan TKS berukuran 2 cm. Penggunaan TKS berukuran 4 dan 6 cm hanya menghasilkan suhu maksimal 85^0C dan 76.5^0C. Gambar 6.6 menampilkan rata-rata waktu didih dari masing-masing bahan bakar.



Gambar 6.6 Waktu Didih Air dari Beberapa Variasi Bahan Bakar

Perbedaan waktu didih masing-masing bahan bakar pada penelitian ini cukup lama. Cangkang sawit menghasilkan waktu didih yang cukup lama dibandingkan dengan pelepah dan TKS yaitu 17.9 menit sedangkan pelepah dan TKS 14.61 dan 9.33 menit. Namun untuk pengaruh ukuran masing-masing bahan bakar hanya terlihat pada pelepah sawit karena cangkang hanya bisa digunakan hanya satu variasi, sedangkan penggunaan bahan bakar TKS sebagian besar tidak mampu mendidihkan 2.5 kg air.

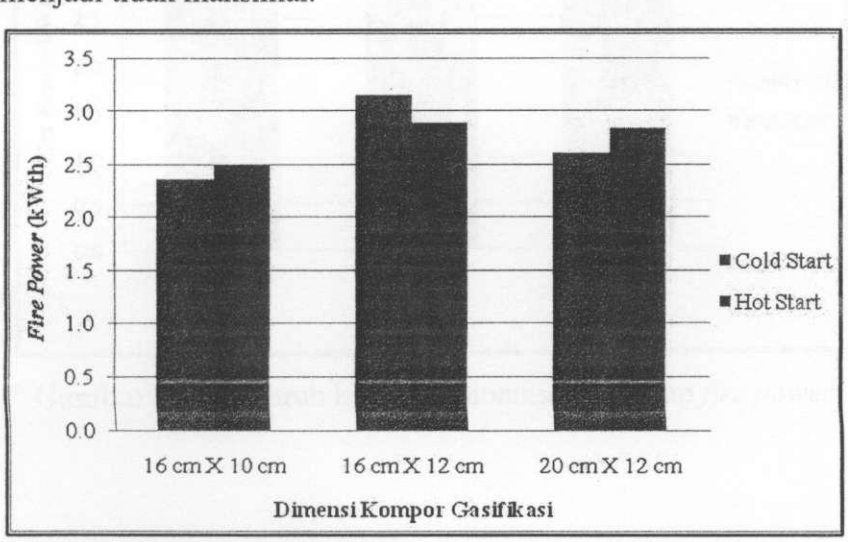
Peningkatan ukuran bahan bakar tidak hanya memperbesar porositas unggun atau memperkecil densitas unggun, tetapi juga mempercepat waktu didih 2.5 kg air. Pelepah dengan potongan 2 cm memiliki waktu didih rata-rata 15.73 menit. Pada ukuran 4 dan 6 cm terjadi penurunan waktu didih menjadi 14.38 menit dan 13.72 menit. Pada penelitian ini tidak terdapat perbedaan waktu didih yang signifikan antara fase *cold start* dengan *hot start* meskipun waktu didih pada

fase *hot start* umumnya sedikit lebih cepat dari *cold start*. Perbedaan waktu didih terbesar hanya 1.22 menit potongan pelepah 6 cm. Sedangkan perbedaan waktu didih dengan pelepah berukuran 2 dan 4 cm hanya 25 dan 24 detik.

6.4 Laju Konsumsi Bahan Bakar dan *Fire power*

Fire power yang dihasilkan dari pembakaran biomassa dipengaruhi oleh diameter ruang bakar. Semakin besar diameter kompor maka akan semakin besar pula daya yang dihasilkan kompor gasifikasi karena akan semakin banyak biomassa yang dapat bereaksi pada waktu bersamaan. *Fire power* rata-rata kompor *forced draft* yaitu 2.9 kWth dengan rentang 2.3 – 3.4 kWth. Nilai *fire power* rata-rata pada penelitian ini lebih besar dibandingkan penelitian Reed *et al.* [2000] dengan kompor *torbo stove* yang berdiameter 10 cm dan tinggi 10 cm yaitu mencapai 2.5 kWth. Pengaruh dimensi kompor gasifikasi terhadap *fire power* kompor dapat dilihat pada Gambar 6.7.

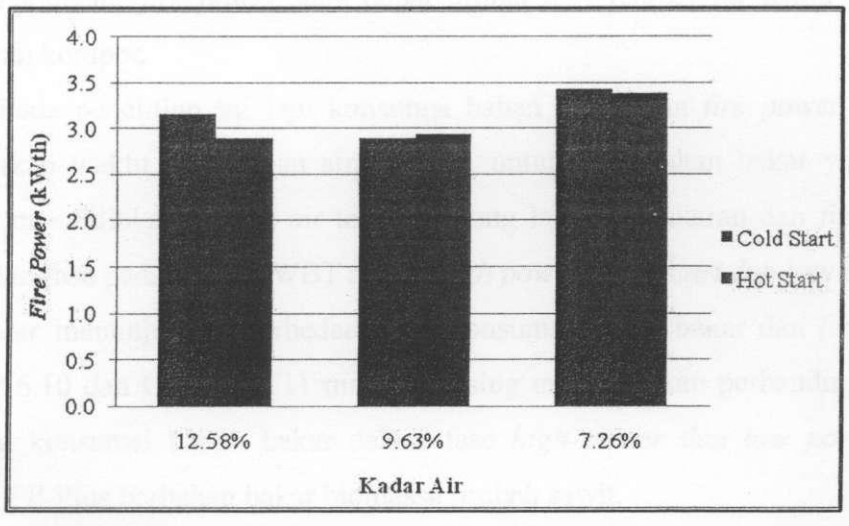
Fire power rata-rata pada kompor gasifikasi forced draft yaitu 3 kWth dengan *fire power* terbesar dihasilkan dari kompor 2 yang berdiameter 12 cm, yaitu mencapai 3.16 kWth. Sedangkan *fire power* terkecil dihasilkan dari kompor 1 yang berdiameter 10 cm yaitu hanya mencapai 2.37 kWth. Pada fase *hot start*, *fire power* yang dihasilkan cenderung lebih besar jika dibandingkan pada fase *cold start*. Energi yang dihasilkan kompor pada fase *cold start* sebagian terserap oleh kompor yang masih dingin sehingga energi yang dapat dihasilkan oleh kompor menjadi tidak maksimal.



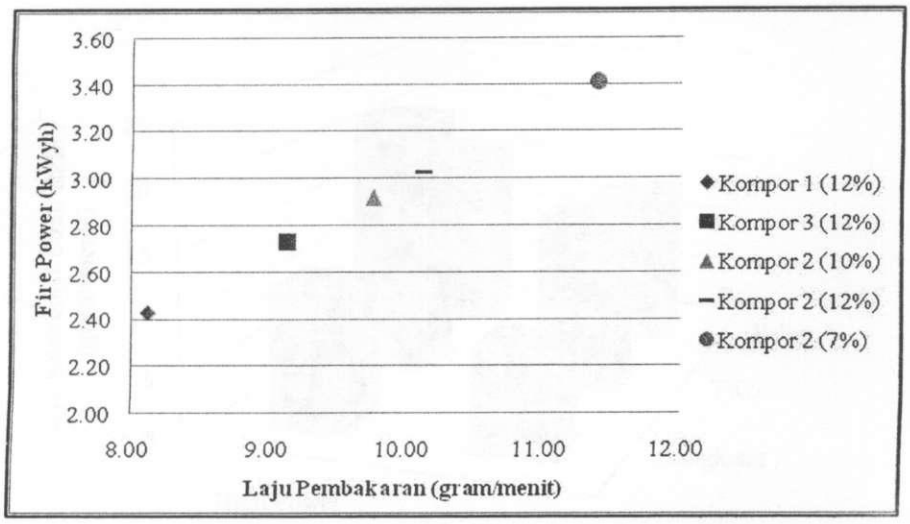
Gambar 6.7 Pengaruh dimensi kompor terhadap *fire powe*

Selain itu, *fire power* juga dapat dipengaruhi oleh kadar air bahan bakar. Hasil penelitian evaluasi kinerja kompor gasifikasi *forced draft* menunjukkan bahwa semakin besar kadar air pada bahan bakar maka *fire power* yang dihasilkan akan semakin kecil, karena pada proses gasifikasi dibutuhkan H_2O pada kadar tertentu untuk menghasilkan gas H_2 pada reaksi pertukaran air-gas dan reaksi uap karbon [Higman 2008]. Gas H_2 memiliki nilai kalor lebih besar jika dibandingkan biomassa ataupun gas mudah terbakar produk gasifikasi. Sehingga semakin banyak jumlah gas H_2 yang dihasilkan maka akan semakin besar pula *fire power* kompor. Pengaruh kadar air terhadap *fire power* kompor dapat dilihat pada Gambar 6.8.

Fire power terbesar dihasilkan dari kompor gasifikasi dengan bahan bakar berkadar air 7.26% yaitu mencapai 3.43 kWth. Pada kompor gasifikasi dengan bahan bakar berkadar air 12.58% dihasilkan energi 3.16 kWth. Sedangkan *fire power* terkecil dihasilkan dari kompor dengan bahan bakar berjadar air 9.63% yaitu 2.9 kWth. *Fire power* kompor gasifikasi erat hubunganya dengan laju pembakaran dan temperatur nyala api. Semakin besar laju pembakaran maka semakin besar energi yang dapat dihasilkan kompor gasifikasi, seperti dapat dilihat pada Gambar 6.9.



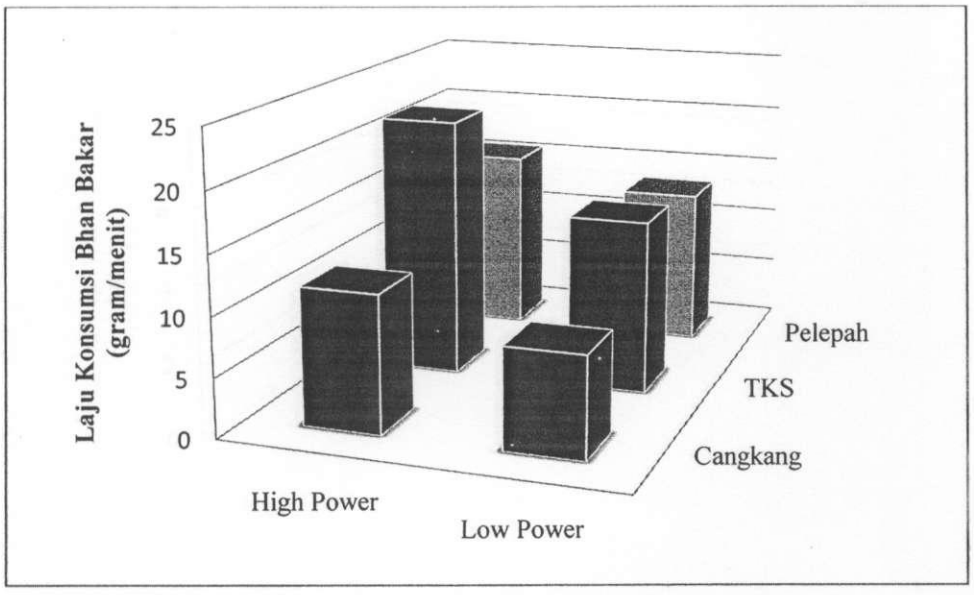
Gambar 6.8 Pengaruh kadar air biomassa terhadap *fire power*



Gambar 6.9 Hubungan laju pembakaran dengan *fire power*

Laju pembakaran menunjukkan besarnya reaksi pembakaran biomassa yang terjadi dalam kompor. Semakin besar laju reaksi maka produksi gas pada proses gasifikasi akan semakin besar sehingga *fire power* juga akan semakin besar. *Fire power* terkecil dihasilkan dari kompor 1 dengan bahan bakar berkadar air 12.38% yang memiliki laju pembakaran 6.12 gram/menit, yaitu sebesar 2.43 kWth. Sedangkan kompor 2 dengan bahan bakar beradar air 7.26% menghasilkan laju pembakaran dan *fire power* terbesar yaitu mencapai 11.40 gram/menit dan 3.41 kWth. Parameter *fire power* juga dapat dilihat dari temperatur nyala api yang dihasilkan kompor.

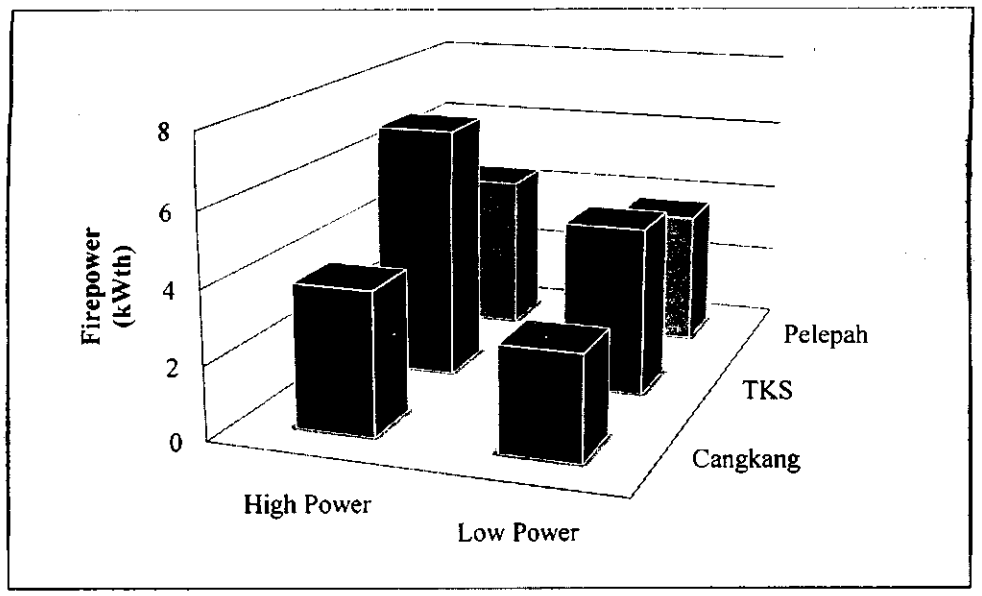
Pada penelitian ini laju konsumsi bahan bakar dan *fire power* dihitung berdasarkan waktu pendidihan air. Namun, untuk data bahan bakar yang tidak mampu mendidihkan 2.5 kg air tetap dihitung laju pembakaran dan *fire power*. Perbedaan fase pada analisa WBT antara *high power* (*cold start* dan low start) dan *low power* menunjukkan perbedaan laju konsumsi bahan bakar dan *fire power*. Gambar 6.10 dan Gambar 6.11 masing-masing menampilkan perbandingan rata-rata laju konsumsi bahan bakar dalam fase *high power* dan *low power* pada kompor PP-Plus berbahan bakar biomassa limbah sawit.



Gambar 6.10 Laju Konsumsi Bahan Bakar pada Kompor PP-Plus

Rata-rata laju konsumsi bahan bakar pada fase *high power* adalah 16.5 gram/menit, dimana laju konsumsi TKS 22.15 gr/menit, pelepah 15 gr/menit dan cangkang 11.61 gr/menit. Kemudian rata-rata laju konsumsi bahan bakar pada fase *low power* adalah 12.22 gr/menit, dimana laju konsumsi TKS 14.78 gr/menit, pelepah 13.38 gr/menit dan cangkang 8.52 gr/menit. Pada bahan bakar cangkang dengan densitas unggun terbesar menghasilkan laju konsumsi bahan bakar terendah. Densitas unggun yang besar menyebabkan resistansi aliran udara primer semakin besar sehingga jumlah bahan bakar yang terkonsumsi setiap waktu menjadi semakin sedikit. Sedangkan pada TKS dengan densitas unggun terkecil menghasilkan laju konsumsi bahan bakar terbesar karena resistansi udara primer tidak terlalu besar.

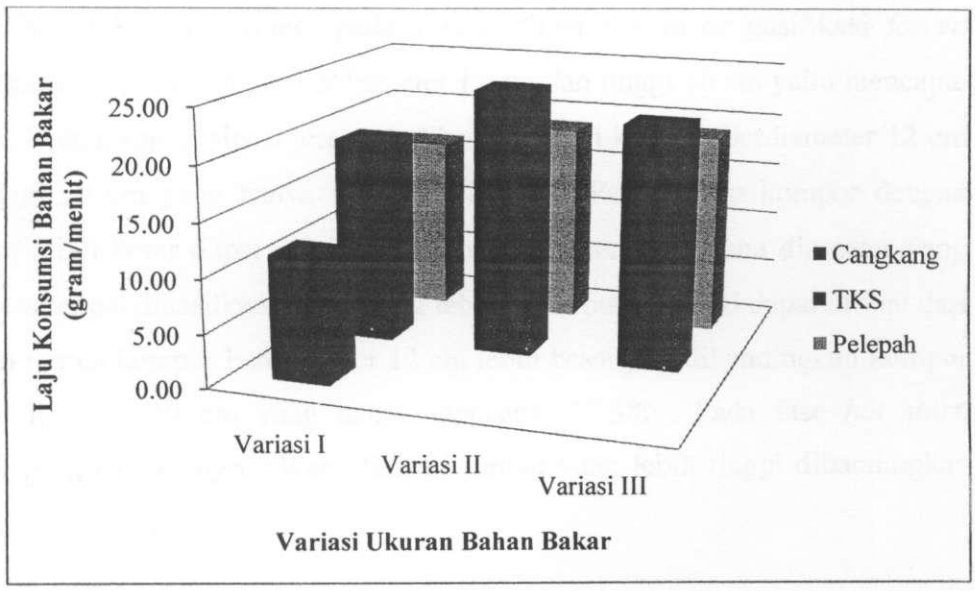
Analisa WBT pada fase *high power* dilakukan dengan mendidihkan air sedangkan fase *low power* dirancang untuk menguji kemampuan kompor dengan nyala api kecil [Bailis, 2007]. Fase *low power* dilakukan dengan menutup sebagian besar lubang udara primer agar nyala gas yang dihasilkan menjadi lebih kecil dan dijaga sehingga suhu air $\pm 3^0$ C dibawah suhu didih air. Penutupan sebagian lubang udara primer mengakibatkan berkurangnya laju konsumsi bahan bakar pada fase *low power*, sehingga laju konsumsi bahan bakar pada fase *low power* menjadi lebih kecil dibandingkan fase *high power*.



Gambar 6.11 *Fire power* Kompor PP-Plus

Profil rata-rata *fire power* dari masing-masing bahan bakar dengan fase *high power* dan *low power* cenderung sama dengan profil laju konsumsi bahan bakar. Dari Gambar 6.11 terlihat bahwa fase *low power* menghasilkan *fire power* cenderung lebih rendah dari fase *high power*. Fire power rata-rata fase *high power* dan *low power* adalah 5.06 kWth dan 3.73 kWth. Pada fase *high power*, kompor menghasilkan *fire power* 3.88 kWth, 4.36kWth dan 6.94 kWth dengan bahan bakar cangkang, pelepah dan TKS. Sedangkan pada fase *low power* menghasilkan fire power 2.85 kWth, 3.71 kWth dan 4.63 kWth.

Variasi bahan bakar juga berpengaruh terhadap laju pembakaran dan *fire power*. Cangkang memiliki laju konsumsi bahan bakar dan *fire power* yang lebih kecil dibandingkan pelepah dan TKS. Kecenderungan kecilnya laju konsumsi dan *fire power* cangkang terlihat pada kedua fase analisa, *high power* dan *low power*. Densitas unggun cangkang lebih besar dari pelapah dan TKS sehingga resistansi unggun terhadap aliran udara primer semakin besar. Dengan besarnya resitansi terhadap aliran udara primer maka semakin sedikit udara primer untuk proses gasifikasi yang ditandai dengan semakin kecilnya laju pembakaran dan *fire power*. Sedangkan variasi bahan bakar terhadap laju konsumsi bahan bakar dan *fire power* dapat dilihat pada Gambar 6.12.



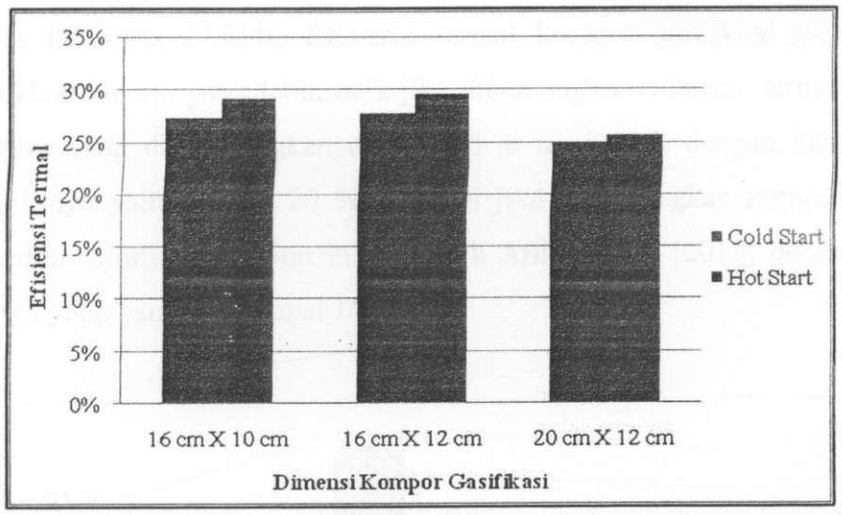
Gambar 6.12 Pengaruh Variasi Ukuran Bahan Bakar terhadap Laju Konsumsi Bahan Bakar

Laju konsumsi bahan bakar selama mendidihkan air menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan dengan variasi ukuran bahan bakar. Laju konsumsi TKS dengan variasi I (2 cm) adalah 19.29 gr/menit, lebih lambat dibandingkan variasi II (4 cm) dan III (6 cm) yaitu 24.7 gr/menit dan 22.47 gr/menit. Kecenderungan meninggkatnya laju konsumsi bahan bakar pada peningkatan variasi ukuran juga disebabkan karena densitas unggun bahan bakar. Peningkatan laju konsumsi bahan bakar juga terjadi pada variasi pelepah. Laju konsumsi pelepah variasi I dengan ukuran potongan 2 cm adalah 16.44 gr/menit dan semakin menigkat pada variasi II (4 cm) dan variasi III (6 cm) yaitu 18.74 gr/menit dan 18.93 gr/menit.

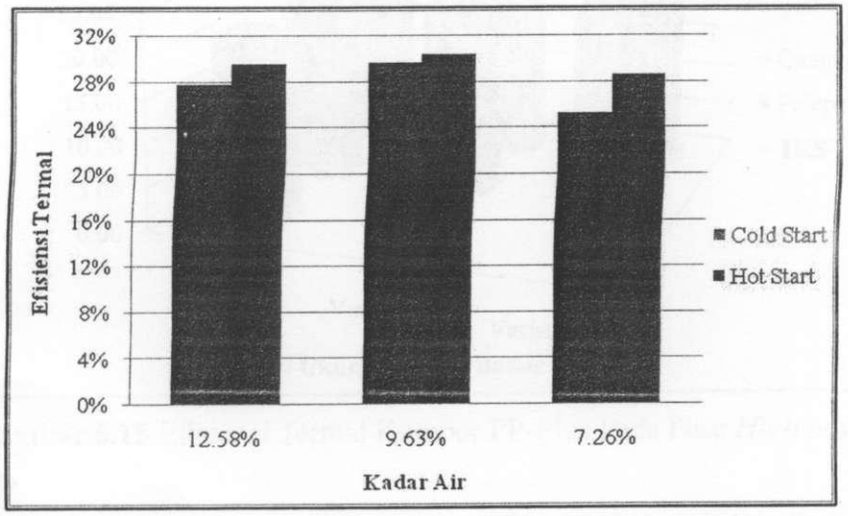
6.5 Efisiensi Termal

Efisiensi termal menggambarkan seberapa besar energi biomassa yang dapat terkonversi oleh kompor menjadi energi termal dalam bentuk nyala api. Pada percobaan ini digunakan 2.5 liter air sebagai media transfer panas untuk menghitung besarnya energi yang dihasilkan oleh kompor. Efisiensi termal dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti dimensi kompor dan kadar air biomassa. Grafik pengaruh dimensi kompor dan kadar air biomassa terhadap efisiensi termal kompor gasifikasi dapat dilihat pada Gambar 6.13 dan Gambar 6.14.

Efisiensi termal tertinggi pada variasi dimensi kompor gasifikasi *forced draft* dihasilkan pada kompor berdiameter 12 cm dan tinggi 16 cm yaitu mencapai 29.59%. Sedangkan efisiensi terendah dihasilkan dari kompor berdiameter 12 cm dan tinggi 20 cm yang hanya mencapai 25.03%. Penggunaan kompor dengan diameter lebih besar dapat meningkatkan efisiensi termal karena diameter yang lebih besar dapat dihasilkan energi yang lebih besar pula, seperti dapat dilihat dari efisiensi termal kompor berdiameter 12 cm lebih besar jika dibandingkan kompor dengan diameter 10 cm yang hanya mencapai 27.38%. Pada fase *hot start*, kompor gasifikasi menghasilkan efisiensi termal yang lebih tinggi dibandingkan pada fase *cold start*.



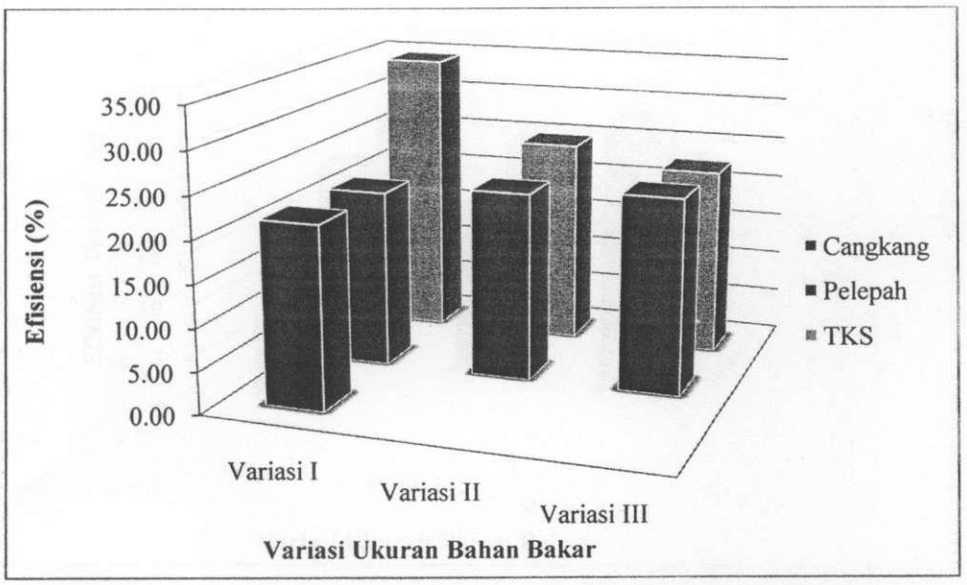
Gambar 6.13 Pengaruh dimensi kompor terhadap efisiensi termal



Gambar 6.14 Pengaruh kadar air biomassa terhadap efisiensi termal

Pengaruh kadar air biomassa terhadap efisiensi termal tidak terlalu tampak. Hasil penelitian kompor gasifikasi biomassa ini menunjukkan, kecenderungan penurunan kadar air bahan bakar berdampak terhadap efisiensi termal yang semakin kecil. Efisiensi termal tertinggi diperoleh dari kompor gasifikasi dengan kadar air 9.63% yaitu mencapai 30.44%. Sedangkan efisiensi termal terendah diperoleh dari kompor dengan biomassa berkadar air 7.26% yaitu sekitar 25.24%. Efisiensi termal yang rendah dihasilkan oleh proses gasifikasi yang kurang sempurna, sehingga untuk mendapatkan efisiensi tertinggi dibutuhkan kadar air yang tepat untuk reaksi-reaksi pada proses gasifikasi.

Kinerja kompor terbaik dapat dilihat dari efisiensi termal yang dapat dicapai oleh kompor. Rata-rata efisiensi termal kompor gasifikasi *forced draft* pada penelitian ini yaitu 27.85%. Efisiensi termal kompor gasifikasi *forced draft* menunjukkan kinerja yang lebih baik jika dibandingkan efisiensi termal kompor *turbo stove* yang dikembangkan oleh Reed *et al.* [2000] dengan bahan bakar potongan kayu yaitu sekitar 20 %. Apalagi jika dibandingkan kompor dengan sistem natural draft "champion 2008" milik Ariho *et al.* [2011] dengan bahan bakar kayu yang hanya mencapai 16%.

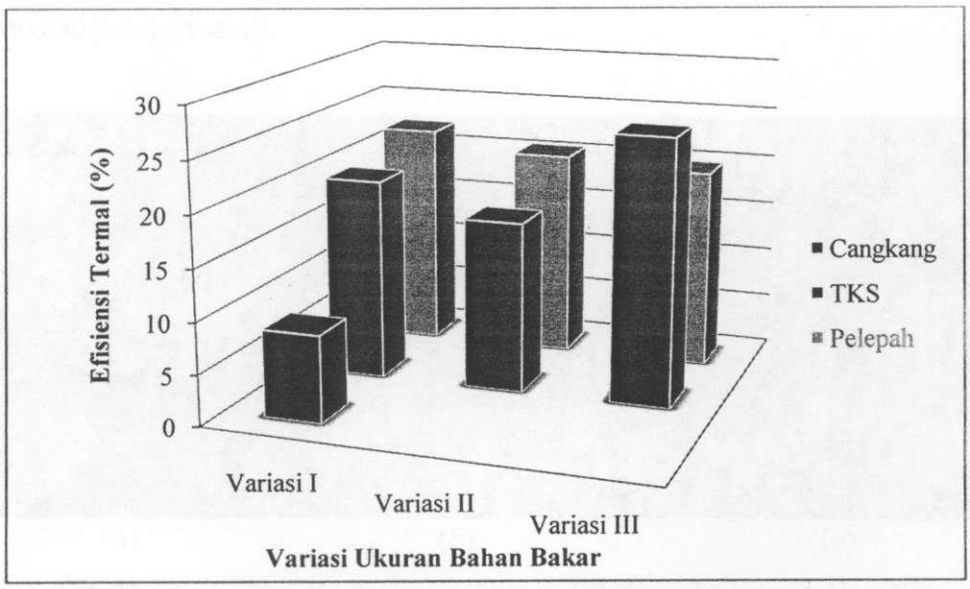


Gambar 6.15 Efisiensi Termal Kompor PP-Plus Pada Fase *High power*

Rata-rata efisiensi termal kompor PP-Plus berbahan bakar limbah sawit adalah 23.65% pada fase *high power* dan 16.75% pada fase *low power*. Sedangkan

rata-rata efisiensi dengan variasi bahan bakar juga berbeda. Rata-rata efisiensi termal pada fase *high power* dengan bahan bakar TKS, pelepah dan cangkang adalah 27.20%, 22.3% dan 21.58%. Pada fase *low power*, kinerja kompor PP-Plus dengan bahan bakar TKS, pelepah dan cangkang menghasilkan efisiensi rata-rata 20.9%, 20.84% dan 8.5%. Gambar 6.15 dan 6.16 menampilkan efisiensi termal fase *high power* dan *low power* dengan berbagai kondisi proses.

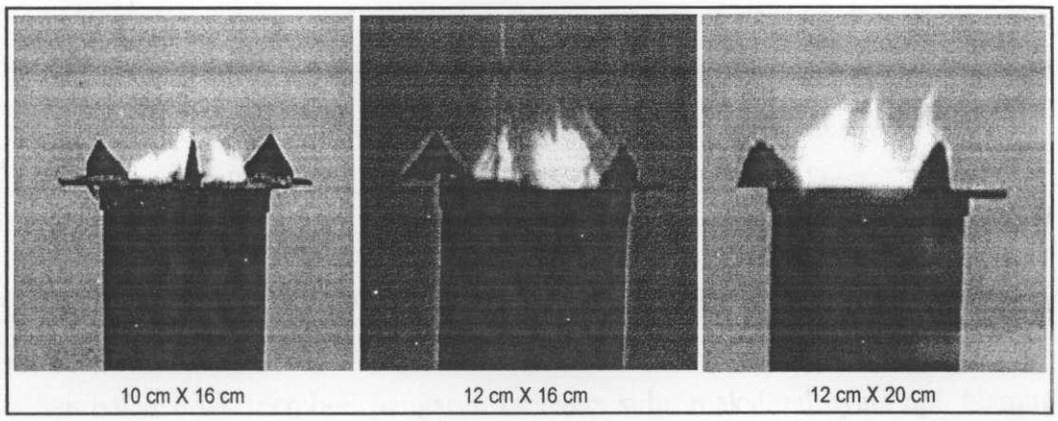
Efisiensi terendah fase *high power* kompor PP-Plus didapat dengan menggunakan bahan bakar pelepah pada variasi I (2 cm) sebesar 21.21%. Sedangkan efisiensi tertinggi didapat dengan TKS pada variasi I (2 cm) sebesar 34.44%. Efisiensi termal pada pelepah semakin meningkat 2.14% dari variasi I sebesar 21.21% ke variasi III (6 cm) menjadi 23.35 %. Sedangkan pada bahan bakar TKS peningkatan ukuran dari 2 cm menjadi 6 cm justru menurunkan efisiensi termal sekitar 12% menjadi 22.47%. Penggunaan bahan bakar cangkang hanya menghasilkan efisiensi sebesar 21.58%. Perbedaan kecenderungan peningkatan dan penurunan efisiensi termal kemungkinan disebabkan karena unggun bahan bakar yang tersusun secara random (acak) sehingga kemungkinan *pressure drop* unggun juga tidak beraturan.



Gambar 6.16 Efisiensi Termal Kompor PP-Plus Pada Fase *Low power*

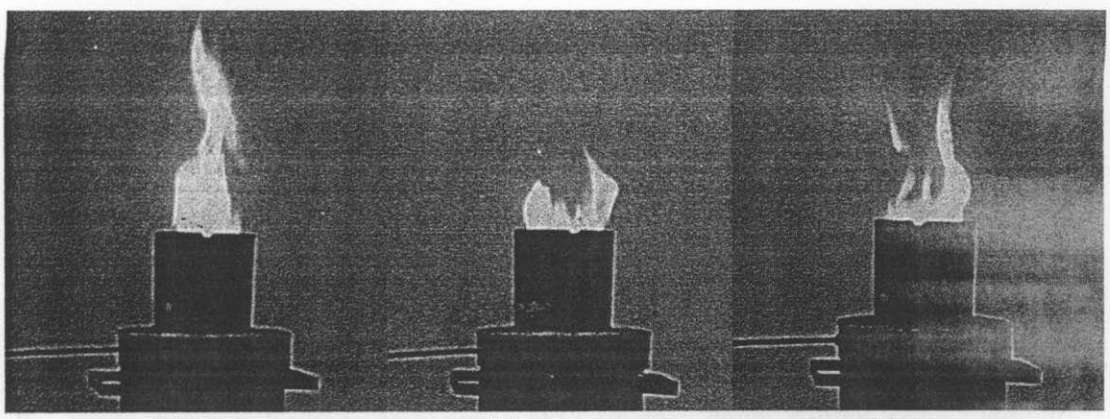
Fase *low power* menghasilkan efisiensi terbesar dengan bahan bakar TKS pada variasi 6 cm yaitu 26.06%, sedangkan efisiensi terendah didapat dengan

yang menyebutkan bahwa temperatur gasifikasi dapat mencapai 800-1400^{O}C [Higman 2008].



Gambar 6.17 Nyala api kompor gasifikasi *forced draft*

Kompor gasifikasi menghasilkan gas sehingga nyala api berada pada bagian atas karena adanya aliran udara sekunder yang bertemu dengan gas hasil gasifikasi. Nyala api kompor PP-Plus dengan bahan bakar limbah sawit umumnya berwarna kuning kemerah-merahan seperti terlihat pada Gambar 6.20. Warna nyala api ini mengindikasikan gas CH_4 yang dihasilkan hanya sedikit. Sedangkan ketinggian nyala api cenderung berbeda-beda dari setiap bahan bakar yang digunakan. Bahan bakar dengan nyala yang paling tinggi adalah TKS dan kemudian pelepah sawit.



(a) (b) (c)

Gambar 6.20 Nyala Api Kompor Gasifikasi PP-Plus dengan Bahan Bakar (a) TKS, (b) Cangkang dan (c) Pelepah Sawit

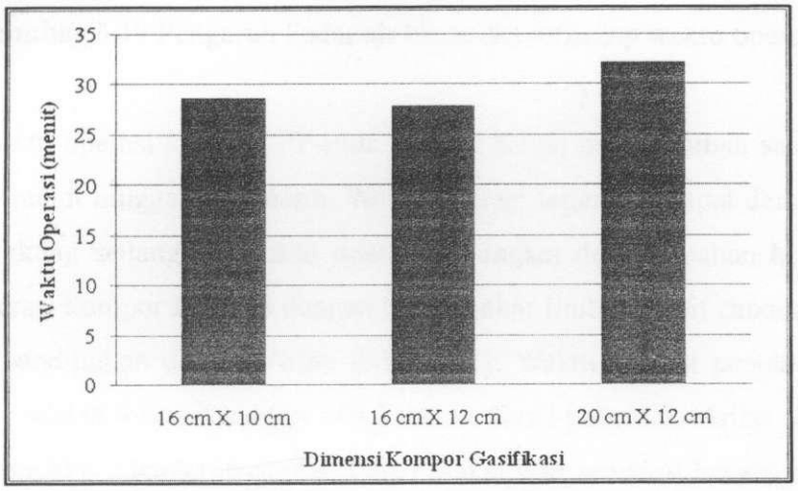
Ketinggian nyala api dipengaruhi oleh densitas unggun bahan bakar. Bahan bakar dengan densitas unggun yang kecil menghasilkan nyala api yang besar. Pada penelitian ini TKS merupakan bahan bakar dengan densitas unggun terkecil sehingga laju pembakarannya juga paling besar dibandingkan bahan bakar lain. Laju pembakaran TKS inilah yang besar menyebabkan nyala api yang dihasilkan menjadi lebih tinggi dibandingkan pelepah dan cangkang.

Nyala api kompor PP-Plus mencapai suhu maksimal 782^0C dengan menggunakan bahan bakar pelepah, sedangkan dengan penggunaan TKS dan cangkang menghasilkan suhu nyala 695 ^{0}C dan 672 ^{0}C. Perbedaan nilai kalor bahan bakar tidak memberi pengaruh terhadap suhu maksimal nyala api. Namun suhu nyala api dipengaruhi oleh proses gasifikasi yang terjadi pada bahan bakar.

Proses gasifikasi menggunakan TKS tidak terjadi dengan sempurna karena udara primer yang masuk terlalu banyak sehingga suhu nyala gas yang dihasilkan tidak terlalu tinggi dan sebagian biomassa terbakar sempurna. Penggunaan TKS sebagai bahan bakar menghasilkan nyala pada bagian atas kompor namun ada juga terlihat juga nyala pada bagian dalam kompor. Besarnya aliran udara primer pada penggunaan TKS ditandai dengan besarnya laju konsumsi bahan bakar selama WBT dilakukan namun tidak menghasilkan suhu yang tinggi meskipun nyala gas api yang dihasilkan paling tinggi. Gasifikasi pada cangkang dan pelepah sawit terjadi tanpa adanya nyala bahan bakar pada bagian dalam kompor. Nyala api yang dihasilkan tepat pada bagian atas pada bagian konsentrator dimana nyala api dihasilkan karena adanya reaksi antar udara sekunder dengan gas hasil gasifikasi.

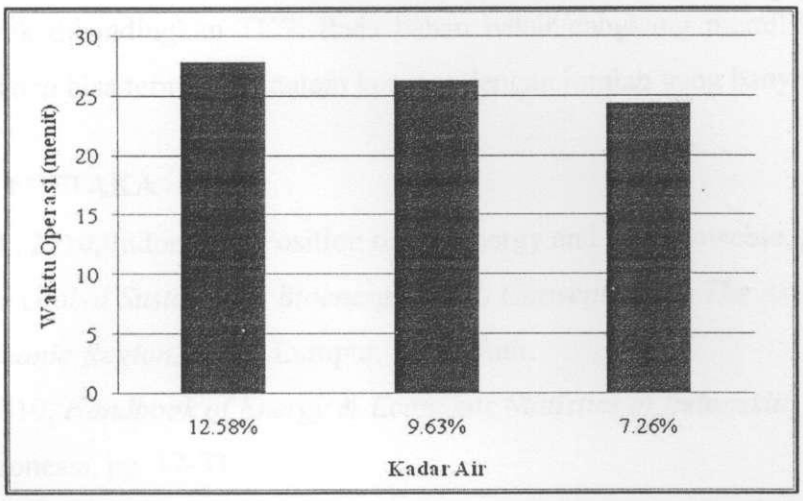
Waktu operasi dihitung mulai dari proses *startup* berakhir atau nyala api stabil hingga nyala api padam dan diakhiri dengan proses *shutdown*. Faktor dimensi kompor dapat mempengaruhi lama waktu operasi kompor gasifikasi. Semakin besar dimensi kompor maka akan semakin lama waktu operasi kompor. Pengaruh dimensi kompor terhadap waktu operasi dapat dilihat pada Gambar 6.18. Selain itu, kadar air bahan bakar juga mempengaruhi lama operasi kompor. Semakin tinggi kadar air maka proses gasifikasi dapat terjadi lebih lama. Pengaruh kadar air biomassa terhadap waktu operasi dapat dilihat pada Gambar 6.19.

Pengaruh tinggi kompor gasifikasi terhadap waktu operasi tampak dari waktu operasi kompor dengan tinggi 16 cm dan diameter 12 cm yang hanya mencapai 27.9 menit. Sedangkan pada kompor dengan tinggi ruang bakar 20 cm dan diameter 12 cm, kompor dapat menghasilkan nyala api yang lebih lama yaitu mencapai 32.23 menit. Namun pengaruh tinggi ruang bakar kompor gasifikasi hanya berlaku untuk kompor dengan sistem bahan bakar *batch* [Andreatta 2007]. Pada sistem bahan bakar batch, semakin tinggi ruang pembakaran kompor maka semakin banyak jumlah biomassa yang dapat diumpankan ke dalam ruang pembakaran.



Gambar 6.18 Pengaruh dimensi kompor terhadap waktu operasi

Kompor dengan biomassa berkadar air 7.26% hanya mampu beroperasi selama 24.41 menit dan kompor dengan bahan bakar berkadar air 9.63% mampu beroperasi selama 26.34 menit. Sedangkan penggunaan biomassa berkadar air 12.58% mampu menghasilkan nyala api selama 27.9 menit. Kadar air bahan bakar yang semakin kecil memudahkan biomassa bereaksi dengan udara tanpa harus banyak menguapkan air dalam bahan bakar sebelum terbakar. Sehingga laju pembakaran yang terjadi akan semakin besar dan bahan bakar lebih cepat habis terbakar.



Gambar 6.19 Pengaruh kadar air biomassa terhadap waktu operasi

Waktu operasi kompor PP-Plus dengan bahan bakar limbah sawit adalah antara 7.4 menit hingga 31.5 menit. Waktu operasi terlama didapat dengan bahan bakar cangkang sedangkan waktu operasi tersingkat dengan bahan bakar TKS. Waktu operasi kompor PP-Plus dengan bahan bakar limbah sawit cenderung lebih singkat dibandingkan dengan Ariho dkk [2011]. Waktu operasi penelitian Ariho dkk [2011] adalah 4 menit hingga 149.5 menit. Hasil penelitian Ariho dkk [2011] juga menunjukkan pengaruh variasi bahan bakar dan semakin besarnya densitas unggun bahan bakar menyebabkan semakin lamanya waktu operasi. Ariho dkk [2011] menggunakan bahan bakar biji jarak sebagai bahan bakar dengan densitas unggun bahan bakar yang tertinggi.

Waktu operasi dengan variasi bahan bakar menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan. Rata-rata waktu operasi kompor PP-Plus dengan bahan bakar TKS adalah 8.3 menit, paling singkat dibandingkan bahan bakar lainnya. Penggunaan bahan bakar pelepah menghasilkan waktu operasi rata-rata selama 25.08 menit sedangkan bahan bakar cangkang cenderung lebih lama yaitu 31.5 menit. Perbedaan waktu operasi dikarenakan jumlah bahan bakar yang termuat di dalam kompor juga berbeda-beda. Karakteristik bahan bakar yang berbeda menyebabkan terjadi perbedaan jumlah bahan bakar yang termuat. Pada bahan bakar TKS, bentuk spiklet yang memiliki bagian menyerupai duri cenderung membutuhkan ruang yang besar bila ditumpuk menjadi unggun. Sedangkan potongan pelepah sawit menyerupai kayu sehingga pelepah sawit bisa dimuat

lebih banyak dibandingkan TKS. Pada bahan bakar cangkang memiliki ukuran yang halus dan bisa termuat ke dalam kompor dengan jumlah yang banyak.

DAFTAR PUSTAKA

Dewi, R.G., 2010, Indonesian Position on Bioenergy and Biorenewable, *prosiding The Global Sustainable Bioenergy (GSB) Convention for The Asia - Oceania Region*, Kuala Lumpur, 14-16 Juni.

ESDM., 2010, *Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia*, 7th edn, Indonesia, pp. 17-33.

Rajvanshi, A.K., 1986, Biomass Gasification, *in DY Guswani (ed), Alternative Energy in Agriculture*, CRC Press, Maharashtra, vol. 2, pp. 83-102.

Panwar, N.L., 2009, Design and Performance Evaluation of Energy Efficient Biomass Gasifier Based Cookstove on Multi Fuels, *Mitig Adapt Strateg Glob Change*, vol. 14, pp. 627-633.

Mukunda, H.S., S. Dassapa, P.J. Paul, N.K.S. Rajan, M. Yagnaraman, D.R. Kumar, dan M. Deogaonkar, 2010, Gasifier Stove-Science, Technology And Field Outreach, *Current Science*, vol. 98, no. 5, pp. 627-638.

Belonio, A.T., 2005, *Rice Husk Gas Stove Handbook*, Appropriate Technology Center, Department of Agriculture Engineering and Environmental Management, Collage of Agriculture, Central Philippine University, Iloilo City, Philippines.

Bailis, R., D. Ogle, N. MacCarty, K.R Smith, dan R. Edwards, 2007, The Water Boiling Test, *http://ehs.sph.berkeley.edu*, 19 Januari 2011.