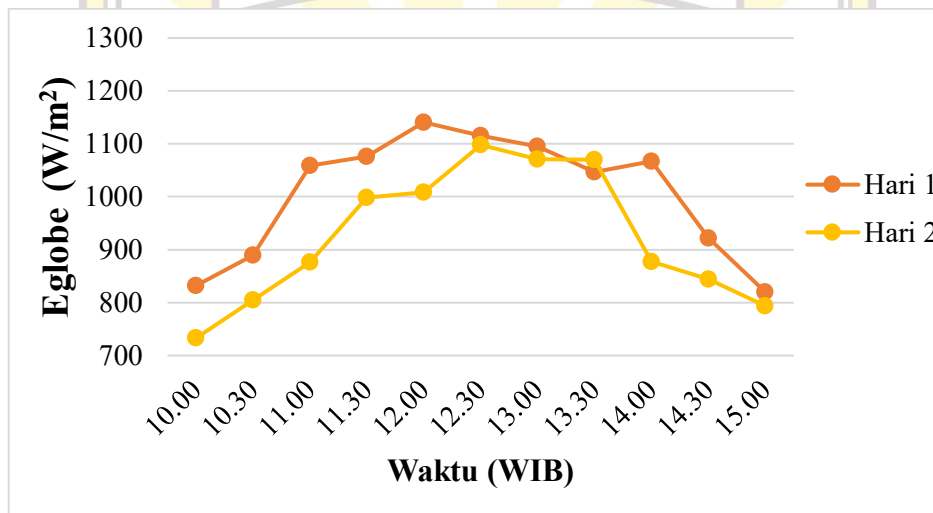


BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perubahan Intensitas Cahaya Matahari Terhadap Waktu

Perubahan intensitas radiasi matahari selama proses pengeringan merupakan salah satu parameter penting yang mempengaruhi kinerja kolektor surya, karena besarnya energi radiasi yang diterima akan menentukan jumlah panas yang dapat dimanfaatkan pada ruang pengering. Berdasarkan data hasil pengukuran yang ditampilkan pada **Gambar 4.1**, intensitas radiasi matahari (E_{globe}) pada kedua hari pengujian menunjukkan pola perubahan yang relatif sama.



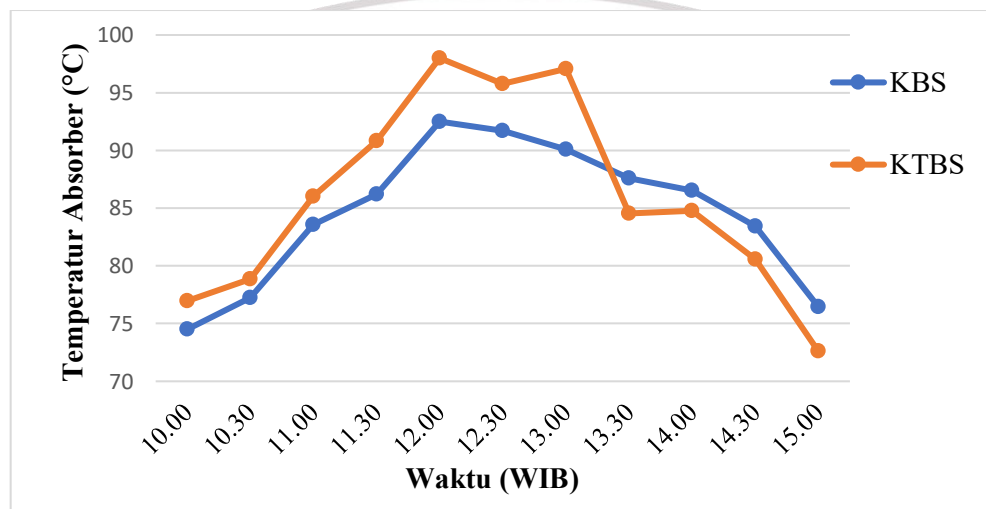
Gambar 4.1 Perubahan intensitas cahaya matahari terhadap waktu

Intensitas radiasi matahari mengalami peningkatan sejak pukul 10.00 WIB hingga mencapai nilai maksimum sekitar pukul 12.00 WIB, kemudian menurun secara bertahap hingga pukul 15.00 WIB. Kondisi ini dipengaruhi oleh perubahan posisi matahari terhadap permukaan kolektor surya, di mana sudut datang radiasi mendekati tegak lurus pada siang hari sehingga energi radiasi yang diterima menjadi lebih besar. Berdasarkan grafik, intensitas radiasi pada Hari 1 umumnya lebih tinggi dibandingkan Hari 2 dengan puncak intensitas terjadi pada waktu yang hampir sama, sedangkan perbedaan nilai yang terjadi dipengaruhi oleh kondisi cuaca seperti keberadaan awan atau kelembaban udara yang mengurangi radiasi yang diterima kolektor. Penurunan intensitas setelah pukul 12.30 WIB menunjukkan berkurangnya energi panas yang diterima kolektor surya sehingga berpotensi menurunkan temperatur udara pengering dan mempengaruhi laju

pengeringan, sehingga perubahan intensitas radiasi matahari berhubungan langsung dengan kinerja kolektor surya dan efektivitas proses pengeringan.

4.2 Perbandingan Temperatur *Absorber* Kolektor

Temperatur absorber merupakan parameter penting dalam mengevaluasi kinerja kolektor surya, karena menunjukkan kemampuan material dalam menyerap dan menyimpan energi radiasi matahari sebelum ditransfer ke udara pengering yang dapat dilihat pada **Gambar 4.2**.



Gambar 4.2 Perbandingan temperatur *absorber* kolektor terhadap intensitas cahaya

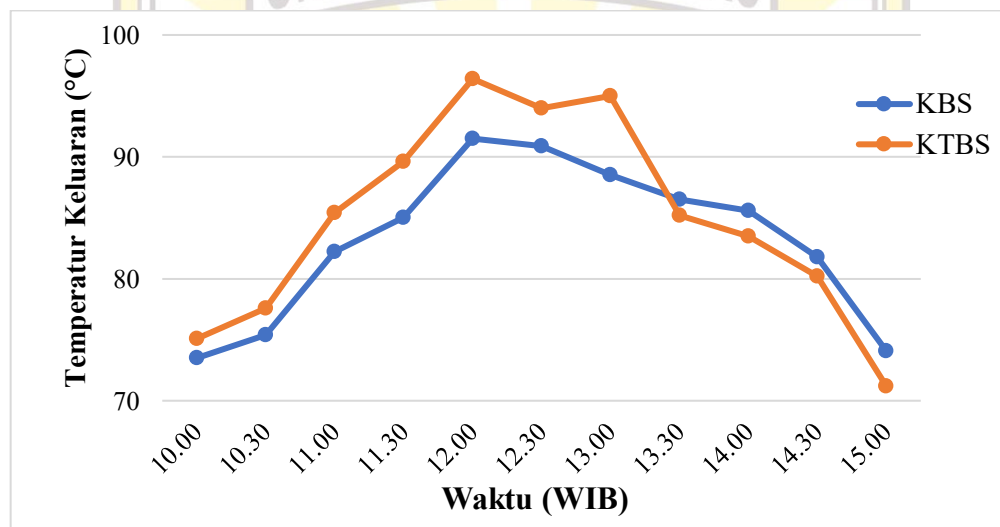
Berdasarkan **Gambar 4.2**, temperatur absorber pada kedua variasi kolektor, yaitu KBS (absorber biochar sekam padi) dan KTBS (tanpa biochar), meningkat seiring dengan kenaikan intensitas radiasi matahari dari pukul 10.00 hingga mencapai puncaknya sekitar pukul 12.00 WIB. Pada saat intensitas maksimum sekitar $1140,76 \text{ W/m}^2$, temperatur absorber KTBS mencapai sekitar 98°C , sedangkan KBS mencapai sekitar $92,5^\circ\text{C}$. Hal ini menunjukkan bahwa KTBS mampu menghasilkan temperatur puncak yang lebih tinggi dibandingkan KBS. Namun, ketika intensitas radiasi menurun hingga sekitar $820,02 \text{ W/m}^2$ pada pukul 15.00 WIB, temperatur absorber KTBS mengalami penurunan yang lebih tajam hingga sekitar $72,6^\circ\text{C}$, sedangkan KBS menurun secara lebih bertahap hingga sekitar $76,47^\circ\text{C}$.

Pola ini menunjukkan bahwa meskipun KTBS unggul dalam menghasilkan temperatur maksimum, sistem KBS memiliki distribusi temperatur yang lebih stabil saat intensitas radiasi menurun. Kestabilan ini mengindikasikan bahwa biochar

sekam padi memiliki kemampuan penyimpanan panas yang baik, sehingga fluktuasi temperatur dapat ditekan. Dengan demikian, dari sisi kinerja termal, KTBS lebih unggul dalam temperatur puncak, sedangkan KBS lebih unggul dalam kestabilan distribusi temperatur selama proses pengeringan.

4.3 Perbandingan Temperatur *Output* Kolektor

Temperatur keluaran (Tout) merupakan temperatur udara panas yang dihasilkan kolektor surya dan dimanfaatkan dalam proses pengeringan kerupuk jengkol. Nilai temperatur keluaran dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari serta karakteristik termal material absorber yang dapat dilihat pada **Gambar 4.3**.



Gambar 4.3 Perbandingan temperatur output kolektor

Berdasarkan **Gambar 4.3**, temperatur keluaran pada sistem KBS dan KTBS meningkat seiring kenaikan intensitas radiasi dari pukul 10.00 hingga mencapai puncaknya sekitar pukul 12.00 WIB. Pada intensitas maksimum sekitar 1140,76 W/m², temperatur keluaran KTBS mencapai sekitar 96°C, sedangkan KBS mencapai sekitar 92°C. Hal ini menunjukkan bahwa KTBS menghasilkan temperatur keluaran yang lebih tinggi pada kondisi radiasi maksimum. Perbedaan ini mengindikasikan adanya variasi karakteristik perpindahan panas antara kedua jenis absorber.

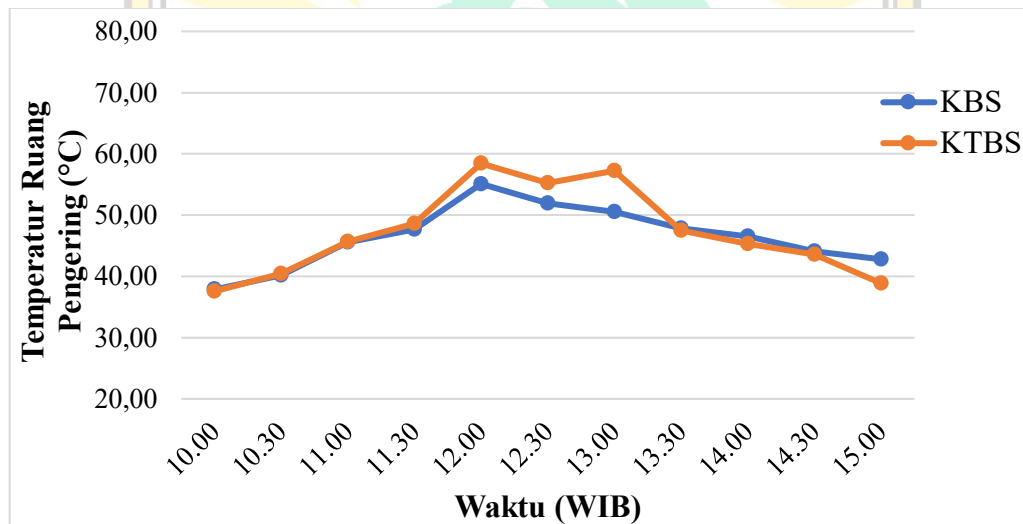
Setelah intensitas radiasi menurun hingga sekitar 820,02 W/m² pada pukul 15.00 WIB, temperatur keluaran kedua sistem juga mengalami penurunan. Temperatur keluaran KBS menurun secara lebih bertahap hingga sekitar 74,1°C, sedangkan KTBS mengalami penurunan yang lebih tajam hingga sekitar 71,2°C.

Pola ini menunjukkan bahwa KBS memiliki kecenderungan distribusi temperatur yang lebih stabil saat intensitas radiasi menurun.

Secara keseluruhan, KTBS unggul dalam menghasilkan temperatur maksimum yang lebih tinggi, sedangkan KBS menunjukkan kestabilan temperatur yang lebih baik. Perbedaan ini mencerminkan pengaruh karakteristik termal absorber terhadap kinerja kolektor surya dalam aplikasi pengeringan kerupuk jengkol.

4.4 Perbandingan Temperatur Ruang Pengering

Temperatur ruang pengering (T_r) merupakan parameter penting dalam mengevaluasi kinerja sistem pengeringan karena secara langsung memengaruhi laju penguapan kadar air kerupuk jengkol yang dapat dilihat pada **Gambar 4.4**.



Gambar 4.4 Perbandingan temperatur ruang pengering terhadap intensitas

Berdasarkan **Gambar 4.4**, temperatur ruang pengering pada sistem KBS dan KTBS meningkat seiring dengan kenaikan intensitas radiasi matahari dari pukul 10.00 hingga mencapai puncaknya sekitar pukul 12.00 WIB. Pada intensitas maksimum sekitar $1140,76 \text{ W/m}^2$, temperatur ruang pengering pada sistem KTBS mencapai sekitar $58,43^\circ\text{C}$, sedangkan pada sistem KBS mencapai sekitar $55,1^\circ\text{C}$. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi radiasi tinggi, sistem KTBS menghasilkan temperatur ruang pengering yang lebih besar dibandingkan KBS.

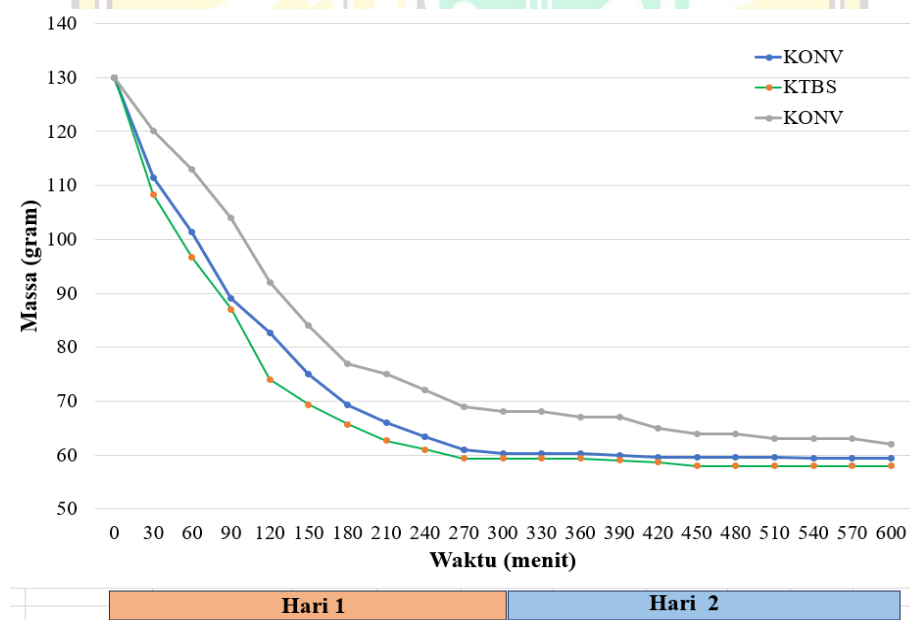
Setelah melewati kondisi maksimum, temperatur ruang pengering pada kedua sistem mengalami penurunan seiring menurunnya intensitas radiasi. Penurunan temperatur pada sistem KBS terjadi secara lebih bertahap, sedangkan

pada KTBS terlihat penurunan yang relatif lebih cepat setelah pukul 13.00 WIB. Pola ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan karakteristik distribusi panas antara kedua jenis absorber.

Secara keseluruhan, sistem KTBS menghasilkan temperatur ruang pengering yang sedikit lebih tinggi pada intensitas maksimum, sedangkan sistem KBS menunjukkan kecenderungan kestabilan temperatur yang lebih baik saat intensitas radiasi menurun. Perbedaan ini mencerminkan pengaruh variasi material absorber terhadap distribusi panas dan kinerja kolektor surya dalam aplikasi pengeringan kerupuk jengkol.

4.5 Penurunan Massa Kerupuk Jengkol

Evaluasi terhadap perubahan massa kerupuk jengkol selama proses pengeringan memberikan gambaran penting mengenai tingkat efektivitas sistem pengering yang digunakan. Penurunan massa menunjukkan terjadinya proses penguapan air dari bahan yang dikeringkan. Perbandingan penurunan massa kerupuk jengkol selama proses pengeringan menggunakan sistem KBS, KTBS, dan metode konvensional (Konv) sebagai pembandingan dapat dilihat pada **Gambar 4.5**.

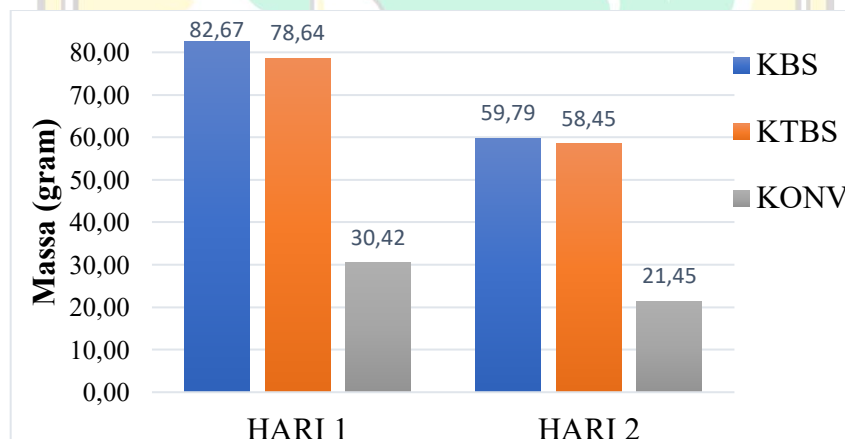


Gambar 4.5 Penurunan Massa Kerupuk Jengkol

Pada 120 menit awal proses pengeringan, seluruh metode menunjukkan penurunan massa yang cukup signifikan. Sistem KTBS mengalami penurunan massa paling cepat, diikuti oleh sistem KBS, sedangkan metode konvensional

menunjukkan penurunan paling lambat. Seiring bertambahnya waktu pengeringan, grafik KTBS dan KBS terus menurun secara konsisten dengan laju penurunan yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Hingga menit ke-600, massa akhir kerupuk jengkol pada sistem KTBS mencapai sekitar 58 gram, pada sistem KBS sekitar 59,33 gram, sedangkan pada metode konvensional masih berada pada kisaran 62 gram. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pengering berbasis kolektor surya, khususnya KTBS, memiliki kinerja perpindahan panas yang lebih baik sehingga mampu mempercepat proses penguapan air dan meningkatkan efektivitas pengeringan dibandingkan metode konvensional.

Perbandingan penurunan massa rata-rata kerupuk jengkol selama proses pengeringan pada hari pertama dan hari kedua menggunakan sistem KBS, KTBS, dan metode konvensional (Konv) dapat dilihat pada **Gambar 4.6**. Grafik ini menunjukkan hasil akhir proses pengeringan pada masing-masing metode dan menggambarkan tingkat efektivitas sistem yang digunakan dalam menurunkan kadar air bahan.



Gambar 4.6 Rata-rata penurunan massa pada variasi absorber

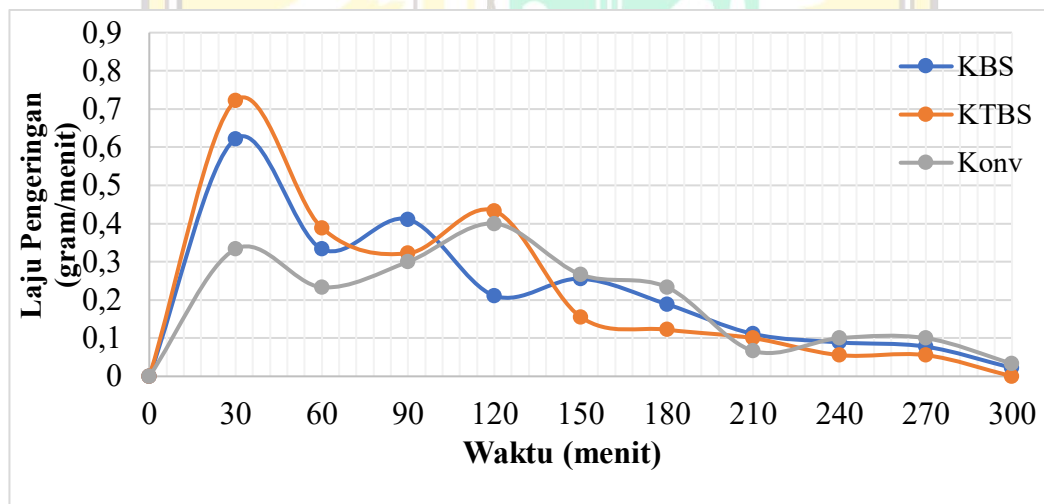
Pada hari pertama, massa sisa kerupuk jengkol tercatat sebesar 91,27 gram pada metode konvensional, 82,67 gram pada sistem KBS, dan 78,64 gram pada sistem KTBS. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem KTBS memiliki massa sisa paling rendah, yang berarti proses pengeringan pada sistem tersebut berlangsung lebih efektif dibandingkan KBS dan metode konvensional pada hari pertama. Memasuki hari kedua, massa sisa kembali menurun menjadi 64,36 gram pada metode konvensional, 59,79 gram pada sistem KBS, dan 58,45 gram pada sistem KTBS. Penurunan ini menunjukkan bahwa proses pengeringan masih terus

berlangsung dan kandungan air dalam kerupuk jengkol semakin berkurang. Pada tahap ini, KTBS masih menunjukkan massa sisa paling rendah, diikuti oleh KBS, sedangkan metode konvensional tetap memiliki massa sisa paling besar.

Secara keseluruhan, sistem pengering berbasis kolektor surya menunjukkan efektivitas pengeringan yang lebih baik dibandingkan metode konvensional, yang ditunjukkan oleh nilai massa sisa yang lebih rendah pada setiap hari pengamatan. Perbedaan antara KBS dan KTBS relatif kecil, sehingga keduanya memiliki performa pengeringan yang hampir sebanding, meskipun KTBS menunjukkan massa sisa yang sedikit lebih rendah dibandingkan KBS.

4.6 Perbandingan Laju Pengeringan Kerupuk Jengkol

Laju pengeringan merupakan parameter penting dalam mengevaluasi kinerja proses pengeringan, karena menunjukkan kecepatan penguapan kadar air dari bahan. Dalam penelitian ini, laju pengeringan kerupuk jengkol dianalisis untuk membandingkan efektivitas tiga metode pengeringan, yaitu sistem KBS, KTBS, dan metode konvensional (Konv). Perbandingan laju pengeringan terhadap waktu dapat dilihat pada **Gambar 4.7**.



Gambar 4.7 Perbandingan laju pengeringan kerupuk jengkol

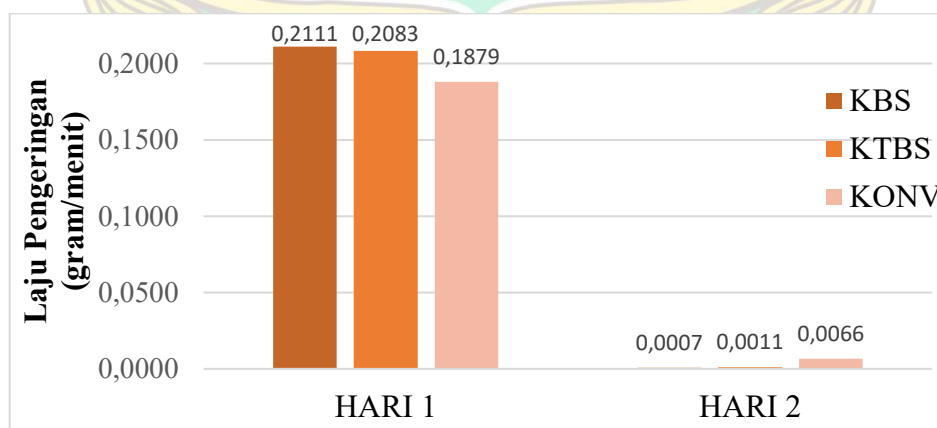
Berdasarkan grafik, pada fase awal pengeringan (0–30 menit), laju pengeringan tertinggi dicapai oleh sistem KTBS dengan nilai sekitar 0,72 gram/menit, diikuti oleh sistem KBS sebesar sekitar 0,62 gram/menit, sedangkan metode konvensional menunjukkan nilai terendah yaitu sekitar 0,33 gram/menit. Hal ini menunjukkan bahwa sistem berbasis kolektor surya, khususnya KTBS,

mampu meningkatkan penyerapan panas pada tahap awal sehingga mempercepat penguapan air bebas pada permukaan kerupuk jengkol.

Seiring bertambahnya waktu pengeringan, laju pengeringan pada ketiga sistem mengalami penurunan secara bertahap. Pada rentang waktu 60 hingga 120 menit, laju pengeringan mulai berfluktuasi dan menunjukkan penurunan, yang menandakan peralihan dari fase laju pengeringan konstan menuju fase laju pengeringan menurun. Pada fase ini, kandungan air bebas pada permukaan bahan mulai berkurang, sehingga proses difusi air dari bagian dalam bahan menjadi faktor utama yang mempengaruhi laju pengeringan.

Setelah melewati 150 menit, laju pengeringan pada ketiga sistem semakin menurun dan cenderung mendekati nol hingga menit ke-300. Kondisi ini menunjukkan bahwa sebagian besar kadar air telah menguap dan bahan mendekati kondisi kering. Pada fase akhir ini, perbedaan laju pengeringan antar sistem semakin kecil, namun KBS dan KTBS masih menunjukkan nilai yang sedikit lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Secara umum, sistem KTBS dan KBS memiliki kinerja pengeringan yang lebih baik dibandingkan metode konvensional, terutama pada fase awal pengeringan, sehingga mampu mempercepat proses pengeringan kerupuk jengkol secara keseluruhan.

Perbandingan rata-rata laju penurunan massa kerupuk jengkol selama proses pengeringan pada hari pertama dan hari kedua menggunakan sistem KBS, KTBS, dan metode konvensional (Konv) disajikan pada **Gambar 4.8**



Gambar 4.8 Perbandingan laju pengeringan rata-rata kerupuk jengkol

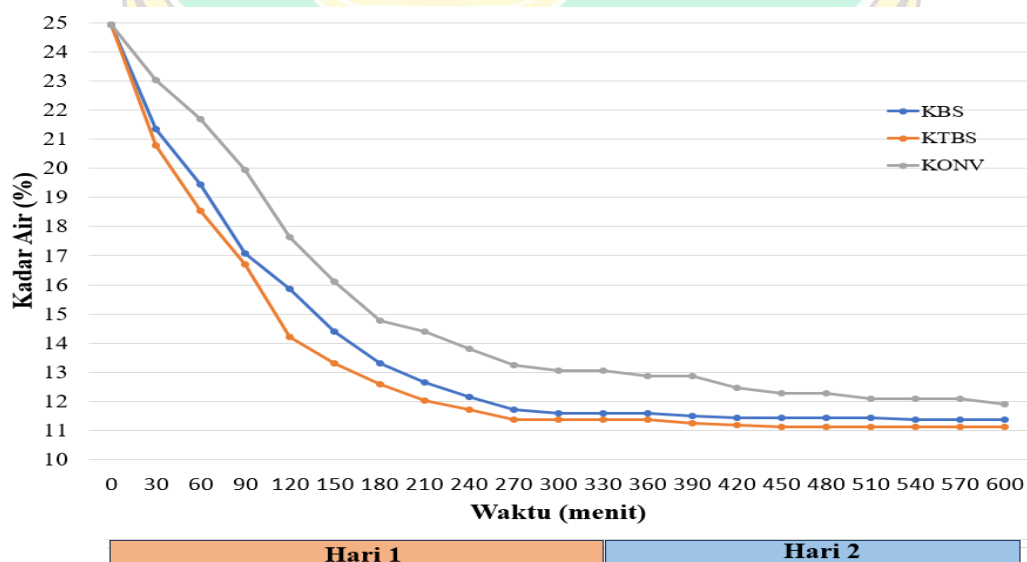
Berdasarkan Gambar 4.8, pada hari pertama sistem KBS menunjukkan laju penurunan massa tertinggi sebesar 0,2111 gram/menit, diikuti oleh KTBS sebesar 0,2083 gram/menit, dan metode konvensional sebesar 0,1879 gram/menit. Hasil ini

menunjukkan bahwa penggunaan kolektor surya, khususnya dengan absorber biochar sekam padi, mampu meningkatkan efektivitas proses pengeringan pada tahap awal. Tingginya laju penurunan massa pada hari pertama berkaitan dengan masih besarnya kandungan air bebas pada kerupuk jengkol, sehingga proses penguapan berlangsung lebih cepat.

Pada hari kedua, laju penurunan massa seluruh metode mengalami penurunan yang sangat signifikan, yaitu KBS sebesar 0,0007 gram/menit, KTBS sebesar 0,0011 gram/menit, dan metode konvensional sebesar 0,0066 gram/menit. Penurunan ini menunjukkan bahwa proses pengeringan telah memasuki fase laju menurun karena sebagian besar kadar air telah menguap. Secara keseluruhan, sistem KBS menunjukkan kinerja terbaik pada tahap awal pengeringan, yang berkaitan dengan kemampuan biochar dalam menyerap dan menyimpan panas sehingga suhu pengering lebih stabil dan proses penguapan berlangsung lebih efektif.

4.7 Perbandingan Penurunan Kadar Air Kerupuk Jengkol

Perbandingan penurunan kadar air (Kr) kerupuk jengkol selama proses pengeringan selama dua hari pada Lampiran A. Ketiga metode yang dibandingkan adalah KBS, KTBS, dan pengeringan konvensional (Konv) seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.9**.



Gambar 4.9 Perbandingan penurunan kadar air kerupuk jengkol

Selama dua hari pengujian, sistem KTBS menunjukkan penurunan kadar air yang paling cepat dan konsisten dibandingkan metode lainnya, hingga mencapai sekitar 11,13% pada menit ke-600. Sistem KBS berada di posisi tengah dengan kadar air akhir sekitar 11,38%, sedangkan metode konvensional menunjukkan penurunan paling lambat dengan kadar air akhir sekitar 11,89%. Penurunan yang lebih cepat pada sistem KTBS mengindikasikan bahwa sistem pengering berbasis kolektor surya mampu meningkatkan kinerja pengeringan secara signifikan.

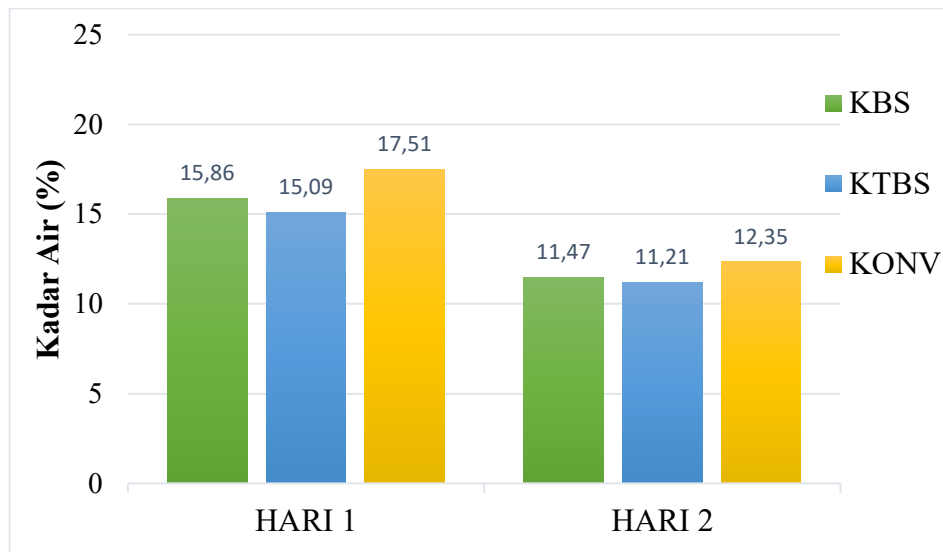
Hal ini disebabkan oleh kemampuan sistem KTBS dalam menyerap, menghantarkan, dan mendistribusikan panas secara lebih efektif, sehingga mempercepat proses penguapan air dari bahan. Sementara itu, metode konvensional memiliki laju penurunan kadar air yang lebih lambat karena keterbatasan dalam mempertahankan suhu pengering yang stabil serta distribusi panas yang kurang merata. Dengan demikian, penggunaan sistem KTBS terbukti lebih efektif dalam menurunkan kadar air kerupuk jengkol dibandingkan sistem KBS maupun metode konvensional.

Selain itu, berdasarkan hasil pengujian pada hari pertama, kadar air kerupuk jengkol pada sistem KTBS dan KBS telah mendekati bahkan memenuhi standar kadar air untuk produk kerupuk kering. Pada rentang waktu sekitar menit ke-300 hingga 360, kadar air pada sistem KTBS berada pada 11,51%, sedangkan pada sistem KBS berada pada 11,7%. Nilai ini telah berada dalam batas kadar air aman untuk penyimpanan dan proses penggorengan, yang umumnya berada di bawah 12%.

Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan kolektor surya, baik dengan absorber biochar sekam padi maupun tanpa biochar, mampu mempercepat proses pengeringan hingga mencapai kondisi standar hanya dalam satu hari pengujian. Oleh karena itu, proses pengeringan pada hari kedua lebih berperan sebagai tahap lanjutan untuk menurunkan kadar air hingga lebih rendah serta meningkatkan kualitas produk secara keseluruhan.

Efektivitas penurunan kadar air kerupuk jengkol selama proses pengeringan pada hari pertama dan hari kedua menggunakan sistem KBS, KTBS, dan metode konvensional (Konv) dapat dilihat pada **Gambar 4.10**. Grafik tersebut menyajikan nilai rata-rata kadar air kerupuk jengkol berdasarkan metode pengeringan yang

digunakan, sehingga dapat menggambarkan kinerja masing-masing sistem dalam menurunkan kadar air bahan.



Gambar 4.10 Penurunan kadar air pada variasi absorber

Berdasarkan Gambar 4.10, secara umum metode pengeringan dengan sistem KBS dan KTBS menghasilkan penurunan kadar air yang lebih baik dibandingkan metode konvensional. Pada hari pertama, kadar air rata-rata kerupuk jengkol pada sistem KBS mencapai 15,86%, pada sistem KTBS sebesar 15,09%, sedangkan metode konvensional sebesar 17,51%. Pada hari kedua, kadar air kembali menurun menjadi 11,47% untuk KBS, 11,21% untuk KTBS, dan 12,35% untuk metode konvensional. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem pengering berbasis kolektor surya mampu mempercepat penurunan kadar air dibandingkan pengeringan konvensional.

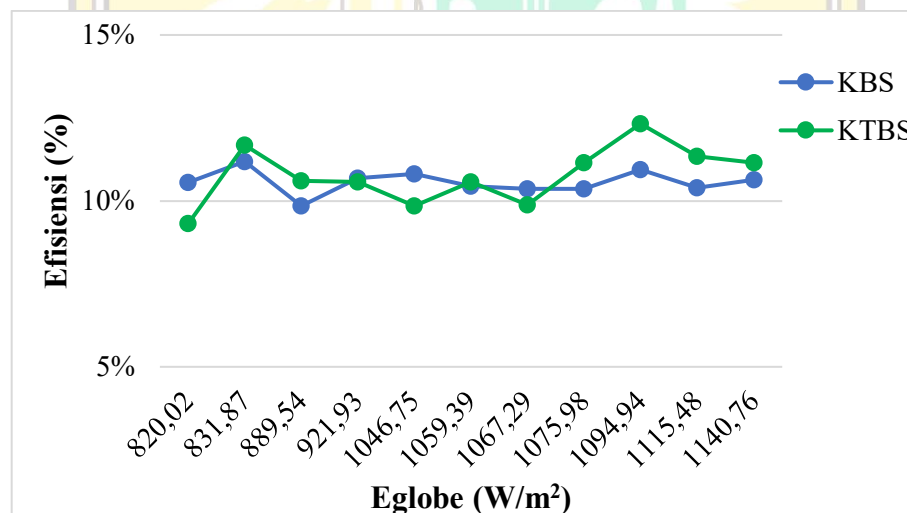
Setelah dua hari pengujian, dilakukan analisis kadar air di Laboratorium Air, Departemen Teknik Lingkungan, Universitas Andalas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar air akhir kerupuk jengkol pada metode KTBS mencapai 6,05%, pada metode KBS sebesar 6,62%, dan pada metode konvensional sebesar 6,77%. Data ini menunjukkan bahwa sistem KTBS menghasilkan kadar air akhir terendah, namun perbedaannya dengan KBS relatif kecil sehingga keduanya sama-sama mampu menghasilkan tingkat kekeringan yang optimal.

Kinerja sistem KBS dalam menurunkan kadar air dipengaruhi oleh karakteristik absorber biochar sekam padi yang memiliki struktur berpori dan warna gelap sehingga mampu menyerap serta menyimpan panas secara efektif.

Kemampuan ini membuat suhu di dalam kolektor dan ruang pengering lebih stabil, sehingga laju penguapan air dapat berlangsung secara konstan dan merata. Dengan demikian, sistem KBS terbukti mampu menurunkan kadar air kerupuk jengkol secara efektif melalui mekanisme penyerapan, penyimpanan, dan distribusi panas yang baik. Meskipun kadar air akhir KBS sedikit lebih tinggi dibandingkan KTBS, perbedaannya relatif kecil dan tidak signifikan, sehingga penggunaan absorber biochar sekam padi tetap memiliki potensi besar sebagai material yang efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk aplikasi pengeringan kerupuk jengkol.

4.8 Perbandingan Efisiensi Kolektor Surya

Dalam sistem pengeringan berbasis energi surya, efisiensi kolektor merupakan parameter penting yang menunjukkan kemampuan kolektor dalam mengonversi radiasi matahari menjadi energi panas yang dapat dimanfaatkan. Efisiensi yang tinggi akan mendukung peningkatan suhu kerja sistem, sehingga proses pengeringan dapat berlangsung lebih cepat dan optimal. Perbandingan efisiensi kolektor surya dengan variasi absorber KBS dan KTBS terhadap intensitas radiasi matahari (E_{globe}) disajikan pada **Gambar 4.11**.



Gambar 4.11 Efisiensi kolektor surya terhadap intensitas

Berdasarkan **Gambar 4.11**, terlihat bahwa efisiensi kolektor pada sistem KBS dan KTBS cenderung mengalami fluktuasi seiring dengan perubahan intensitas radiasi matahari. Secara umum, nilai efisiensi berada pada kisaran sekitar 9,2% hingga 12,6%. Pada sebagian besar rentang intensitas, sistem KTBS menunjukkan nilai efisiensi yang sedikit lebih tinggi dibandingkan KBS, terutama

pada intensitas di atas 1.070 W/m^2 , di mana efisiensi KTBS mencapai nilai maksimum sekitar 12,5%, sedangkan KBS berada pada kisaran 11,0%.

Perbedaan ini menunjukkan bahwa sistem KTBS memiliki kemampuan yang lebih baik dalam memanfaatkan energi radiasi matahari menjadi energi panas. Hal ini diduga berkaitan dengan karakteristik permukaan absorber yang lebih efektif dalam menyerap radiasi serta mengurangi kehilangan panas. Sementara itu, sistem KBS tetap menunjukkan kinerja yang stabil dengan nilai efisiensi yang relatif konsisten pada berbagai tingkat intensitas, yang menandakan kemampuan biochar dalam menjaga kestabilan suhu dan distribusi panas di dalam kolektor. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa baik sistem KBS maupun KTBS mampu bekerja secara efektif dalam memanfaatkan energi surya untuk proses pengeringan. Meskipun KTBS menunjukkan efisiensi yang sedikit lebih tinggi, perbedaan dengan KBS relatif kecil dan tidak signifikan, sehingga kinerja kedua sistem dapat dikatakan sebanding dalam aplikasi praktis.

Selain itu, biochar sekam padi memiliki keunggulan dari sisi lingkungan dan ekonomi. Biochar merupakan material yang berasal dari limbah pertanian berupa sekam padi yang ketersediaannya melimpah di Indonesia, sehingga pemanfaatannya dapat membantu mengurangi limbah sekaligus mendukung pengembangan teknologi energi terbarukan yang berkelanjutan. Dari sisi biaya, biochar relatif murah dan mudah diperoleh dibandingkan material absorber konvensional, sehingga lebih sesuai untuk diterapkan pada skala UMKM.

Karakteristik biochar yang memiliki struktur berpori, warna gelap, serta kemampuan menyerap dan menyimpan panas memberikan kontribusi terhadap kestabilan temperatur selama proses pengeringan. Oleh karena itu, penggunaan biochar sekam padi sebagai absorber tidak hanya berfungsi sebagai alternatif teknis, tetapi juga sebagai solusi yang ramah lingkungan, ekonomis, dan berkelanjutan dalam pengembangan kolektor surya untuk aplikasi pengeringan.