

ANALISIS LAJU DEHIDRASI MADU DENGAN DEHIDRATOR TIPE KABINET TERBANTU GELOMBANG ULTRASONIK

Kukuh Genial Putra¹, Sang Kompiang Wirawan^{2*}, Ria Millati³

¹Magister Teknik Sistem Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada

Jl. Teknika Utara No. 3, Barek, Yogyakarta, 55281

²Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada

Jl. Grafika No. 2, Kampus UGM, Yogyakarta, 55281

³Departemen Teknologi Pangan dan Hasil Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian
Universitas Gadjah Mada

Jl. Flora No. 1, Bulaksumur, Yogyakarta, 55281

*Email: skwirawan@ugm.ac.id

Abstrak

Dehidrasi madu dilakukan untuk mendapatkan madu dengan kadar air sesuai standar yang ditentukan, yaitu 22%bb menurut SNI 8664:20114 Madu. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis laju dehidrasi pada proses dehidrasi madu, serta menentukan nilai koefisien transfer massa. Dehidrasi madu dilakukan dengan dehidrator tipe kabinet terbantu gelombang ultrasonik. Gaya terlibat dengan penambahan gelombang ultrasonik diharapkan dapat mempercepat laju dehidrasi. Sebanyak 7 buah sampel madu diletakan pada setiap tingkat loyang untuk setiap variasi tebal madu, yaitu pada ketebalan 0,208 cm, 0,417 cm, dan 0,625 cm. Grafik hubungan kadar air terhadap fungsi waktu menunjukkan sampel madu relatif tipis lebih cepat mengalami penurunan kadar air, begitu pula sampel madu yang diletakan paling dekat dengan elemen pemanas. Grafik hubungan laju dehidrasi terhadap fungsi kadar air menunjukkan sampel madu relatif tebal memiliki laju dehidrasi lebih tinggi, begitu pula sampel madu yang diletakan paling dekat dengan elemen pemanas. Koefisien transfer massa untuk tingkat loyang 1 pada variasi tebal madu berturut-turut $1,21 \times 10^{-3}$ g/cm².menit; $1,42 \times 10^{-3}$ g/cm².menit; dan $1,87 \times 10^{-3}$ g/cm².menit. Nilai koefisien transfer massa tersebut relatif lebih tinggi dibanding tingkat loyang 4 pada setiap variasi tebal madu, yaitu berturut-turut $0,87 \times 10^{-3}$ g/cm².menit; $1,13 \times 10^{-3}$ g/cm².menit; dan $1,33 \times 10^{-3}$ g/cm².menit.

Kata kunci : Dehidrasi madu; laju dehidrasi; gelombang ultrasonik

1. PENDAHULUAN

Madu merupakan zat pangan penting hasil interaksi *Apis Mellifera* L. sebagai penyerbuk, dan lingkungan (Hawkins dkk., 2015). Madu adalah zat pemanis alami yang dihasilkan oleh lebah madu dari nektar tanaman, atau dari sekresi tanaman yang dikumpulkan oleh lebah. Lebah mengumpulkan, mengubah dengan mengombinasikan dengan zat-zat khas miliknya, mengeringkan, menyimpan, dan meninggalkan zat tersebut dalam sarang untuk proses pematangan (CAC, 2019). Madu dapat digunakan sebagai stimulan pencernaan, dan perbaikan nafsu makan, karena kandungan glukosa (*dekstrosa*), dan fruktosa (*levulosa*) yang tinggi, serta mudah diserap usus (Muslim, 2014). Madu juga mengandung antioksidan enzimatis, seperti katalase, glukosa oksidase, dan peroksidase, serta antioksidan non-enzimatis, seperti asam askorbat, flavonoid, asam amino, dan protein (Evahelda dkk., 2018).

Indonesia sebagai negara dengan keanekaragaman hayati yang kaya menjadi salah satu negara penghasil produk hasil hutan bukan kayu berupa madu. Penetapan standar mutu merupakan salah satu upaya perlindungan industri dalam negeri sekaligus perlindungan konsumen produk. Dalam upaya tersebut, pemerintah Indonesia mengeluarkan regulasi teknis berupa penerapan Standar Nasional Indonesia (Herjanto, 2011). Dalam upaya menjaga mutu, dan standar produk madu, telah ditetapkan SNI (Standar Nasional Indonesia) pada madu melalui SNI 8664:2018 Madu yang diterbitkan oleh BSN (2018).

Salah satu indikator penting tercantum dalam SNI yang menentukan kualitas madu adalah kadar air (Savitri dkk., 2019). Sebagai negara beriklim tropis, Indonesia memiliki kelembapan relatif (RH) yang tinggi, yaitu berkisar antara 60% hingga 90%. Karena sifatnya yang hidroskopis (mudah menyerap

air), madu hasil panen di Indonesia memiliki kadar air yang tinggi, yaitu 18% sampai dengan 33,1% (Sihombing, 2005). Kadar air yang tinggi menyebabkan madu rentan mengalami kerusakan karena dapat mengalami fermentasi. Fermentasi pada madu terjadi jika khamir (ragi yang terdapat dalam madu) mendapatkan media pada kadar air tinggi ($\geq 23\%$) (Harmen dan Sebastian, 2013). Guna mencegah turunnya mutu madu sebagaimana disebut di atas, telah ditetapkan persyaratan kadar air madu dalam SNI 3664:2018, yaitu maksimum 22%bb untuk madu hutan, dan madu budidaya.

Pentingnya menjaga kualitas bahan pangan berkaitan dengan perlindungan konsumen terhadap manfaat yang diterima sebagai aktivitas konsumsi bahan pangan tersebut. Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mendapatkan madu dengan kadar air sesuai standar mutu yang diterapkan adalah melalui proses dehidrasi. Dehidrasi dilakukan dengan menguapkan sejumlah air dari bahan pangan basah dengan bantuan panas. Kadar air yang berkurang menyebabkan turunnya nilai aktivitas air (A_w) yang berpotensi menghambat tumbuhnya mikroorganisme, dan reaksi kimia penyebab turunnya mutu pangan (Asiah dan Djaeni, 2021).

Pemanfaatan gelombang ultrasonik dapat menjadi alternatif pada pengolahan makanan. de la Fuente-Blanco dkk. (2006) menyebutkan proses dehidrasi bahan peka panas merupakan salah satu potensi pemanfaatan gelombang ultrasonik. Terdapat sejumlah skenario yang terjadi pada pemanfaatan gelombang ultrasonik pada proses dehidrasi. Pada saat diarahkan menuju bahan pangan yang dikeringkan, gelombang ultrasonik merambat melalui medium menyebabkan kompresi, dan ekspansi alternatif yang cepat, serupa dengan dengan cara spons mengempis, dan mengembang untuk mengeluarkan airnya. Gaya terlibat pada mekanisme ini lebih tinggi daripada tegangan permukaan, dan dapat menciptakan saluran mikroskopis sehingga penurunan kadar air dapat berlangsung lebih mudah. Gelombang ultrasonik juga dapat menghasilkan kavitasi (gelembung-gelembung pada zat cair karena tekanan berkurang) yang membantu mempercepat turunnya kadar air. Ultrasonik juga berperan mengurangi lapisan batas difusi, dan meningkatkan perpindahan massa

konvektif dalam bahan pangan. Dengan demikian, pemanfaatan gelombang ultrasonik diklaim mampu melakukan proses dehidrasi dengan waktu yang lebih singkat dibanding dehidrasi serupa tanpa bantuan ultrasonik, meningkatkan kualitas organoleptik, dan menghasilkan produk yang stabil (Chemal dkk., 2011).

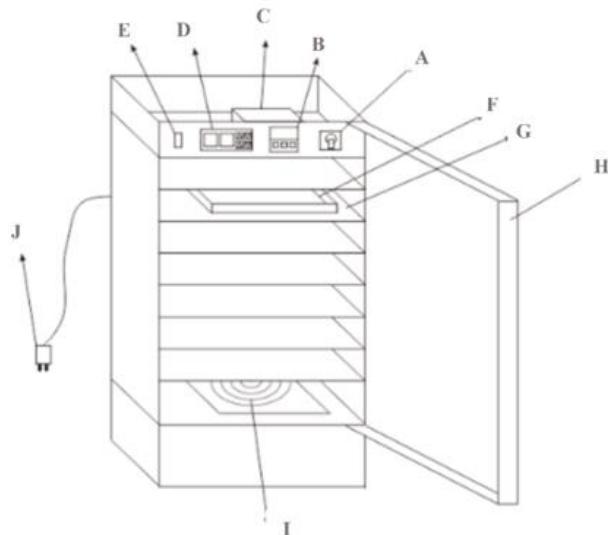
Metode dehidrasi mengalami pengembangan teknologi yang mencakup tiga hal pokok, yaitu laju dehidrasi, energi dehidrasi, dan mutu produk akhir (Asiah dan Djaeni, 2021). Laju dehidrasi yang tinggi, energi dehidrasi yang rendah, dan mutu produk akhir mendekati produk segarnya menjadi pilihan terbaik. Inovasi proses dehidrasi madu terus berkembang, seperti dehidrasi dengan metode sistem berkondensor oleh Amanto dkk. (2012), metode dehidrator vakum oleh Johanes dan Yohanes (2015) dan metode *adsorption drying* oleh Maliaentika dkk. (2016).

Pada penelitian ini, inovasi proses dehidrasi madu dengan bantuan gelombang ultrasonik dilakukan. Penambahan gelombang ultrasonik bertujuan untuk mempercepat proses dehidrasi tanpa menaikkan suhu dehidrator. Tujuan pada penelitian ini adalah menyajikan analisis laju dehidrasi pada beberapa variasi ketebalan madu. Selanjutnya koefisien transfer massa terhadap variasi tebal madu, dan tingkat loyang dalam dehidrator tipe kabinet terbantu ultrasonik akan ditinjau sebagai pembahasan lebih lanjut.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan pada penelitian adalah madu berjenis madu durian yang didapatkan dari petani madu di Temanggung. Dehidrasi madu dilakukan dengan dehidrator tipe kabinet terbantu ultrasonik yang dapat dijumpai di Laboratorium Teknik Pengolahan Sumber Daya Hayati dan Biomaterial Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada. Dehidrator sudah dilengkapi *thermostat* dan *hygrostat* untuk mengamati suhu, dan kelembapan dalam ruang dehidrator. Pengukuran kadar air madu dilakukan pada interval waktu 30 menit dengan menggunakan refraktometer.



Gambar 1. Skema alat mesin pengering dengan ultrasonik

Keterangan gambar:

- A = Tombol *power* dehidrator
- B = Pengatur interval pemancar gelombang ultrasonik
- C = Pemancar gelombang ultrasonik
- D = *Thermostat* dan *hygostat*
- E = Tombol *power* pemancar gelombang ultrasonik
- F = Nampan
- G = Rak penyimpanan bahan
- H = Penutup dehidrator
- I = Pemanas elemen
- J = Steker

2.2. Prosedur Penelitian

Percobaan dimulai dengan melakukan kalibrasi refraktometer. Cairan kalibrasi memiliki nilai kadar air tertera pada spesifikasi produk. Cairan kalibrasi diteteskan pada *cover plate* refraktometer, kemudian ditutup. Hasil bacaan nilai kadar air dapat dilihat melalui *eyepiece* refraktometer. Skala pada refraktometer diatur hingga menempati nilai yang sama dengan spesifikasi cairan kalibrasi (23%) dengan menggunakan *calibration screw*.

Sampel madu ditempatkan pada tujuh buah *tray* (nampan) berukuran $30 \times 40 \text{ cm}^2$ dengan ketebalan 0,208 cm (setara dengan 250 mL). Nampan yang telah terisi madu dimasukan ke dalam dehidrator ultrasonik pada setiap rak penyimpanan bahan. dehidrator diatur pada suhu maksimum $41,5^\circ\text{C}$, dan gelombang ultrasonik dinyalakan. Pengukuran kadar air dilakukan setiap 30 menit dengan pengukuran

menggunakan refraktometer pada ketujuh sampel setiap rak, dan dilakukan pencatatan. Dehidrasi madu dilakukan selama 4 jam (240 menit). Langkah yang sama dilakukan pada dehidrasi madu dengan variasi ketebalan 0,417 cm (setara dengan 500 mL), dan 0,625 cm (setara 750 mL).

2.3. Analisis Data

Data kadar air ketujuh sampel madu setiap tingkat loyang dikonversi menjadi satuan kadar air basis kering, dan disajikan dalam grafik hubungan kadar air terhadap fungsi waktu. Konversi kadar air basis basah menjadi kadar air basis kering memenuhi hubungan,

$$X = \frac{x}{1-x}, \quad (1)$$

dengan x adalah kadar air basis basah yang didapat dari percobaan, dan X adalah kadar air basis kering dengan satuan $\text{g H}_2\text{O}/\text{g madu kering}$.

Kinetika dehidrasi dapat dijelaskan dengan mengonversi grafik kadar air sebagai fungsi waktu menjadi grafik laju dehidrasi sebagai fungsi kadar air. Laju dehidrasi dapat dihitung melalui persamaan (Treybal, 1981),

$$N = -\frac{S_s dX}{A dt}, \quad (2)$$

dengan S_s adalah total padatan kering, A adalah luas permukaan dehidrasi, dan dX/dt adalah

gradien kadar air dalam bahan terhadap waktu. Laju dehidrasi N memiliki satuan $g H_2O/cm^2 \cdot \text{menit}$.

Hubungan laju dehidrasi dengan kadar air pada periode laju menurun (*falling rate period*) dapat didekati dengan teori geometri melalui persamaan,

$$N = \frac{X - X_e}{X_{cr} - X_e} \cdot N_c. \quad (3)$$

dengan x_e adalah kadar air pada titik setimbang, x_{cr} adalah kadar air pada titik kritis, dan N_c adalah laju dehidrasi pada titik kritis.

Adapun hubungan transfer massa uap air dari permukaan bahan ke udara dianggap mengikuti persamaan,

$$N_c = k_y (y^* - y_G). \quad (4)$$

dengan k_y adalah koefisien transfer massa, dan y adalah kadar uap; y_G untuk kadar uap di udara (gas), dan y^* untuk kadar uap jenuhnya.

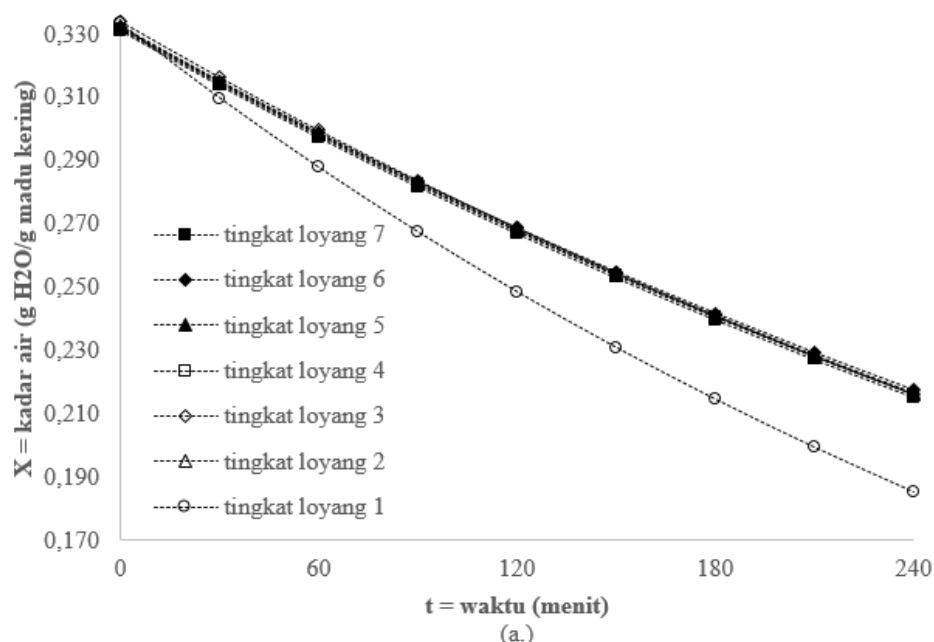
Sehingga substitusi persamaan (2), (3), dan (4) menghasilkan persamaan,

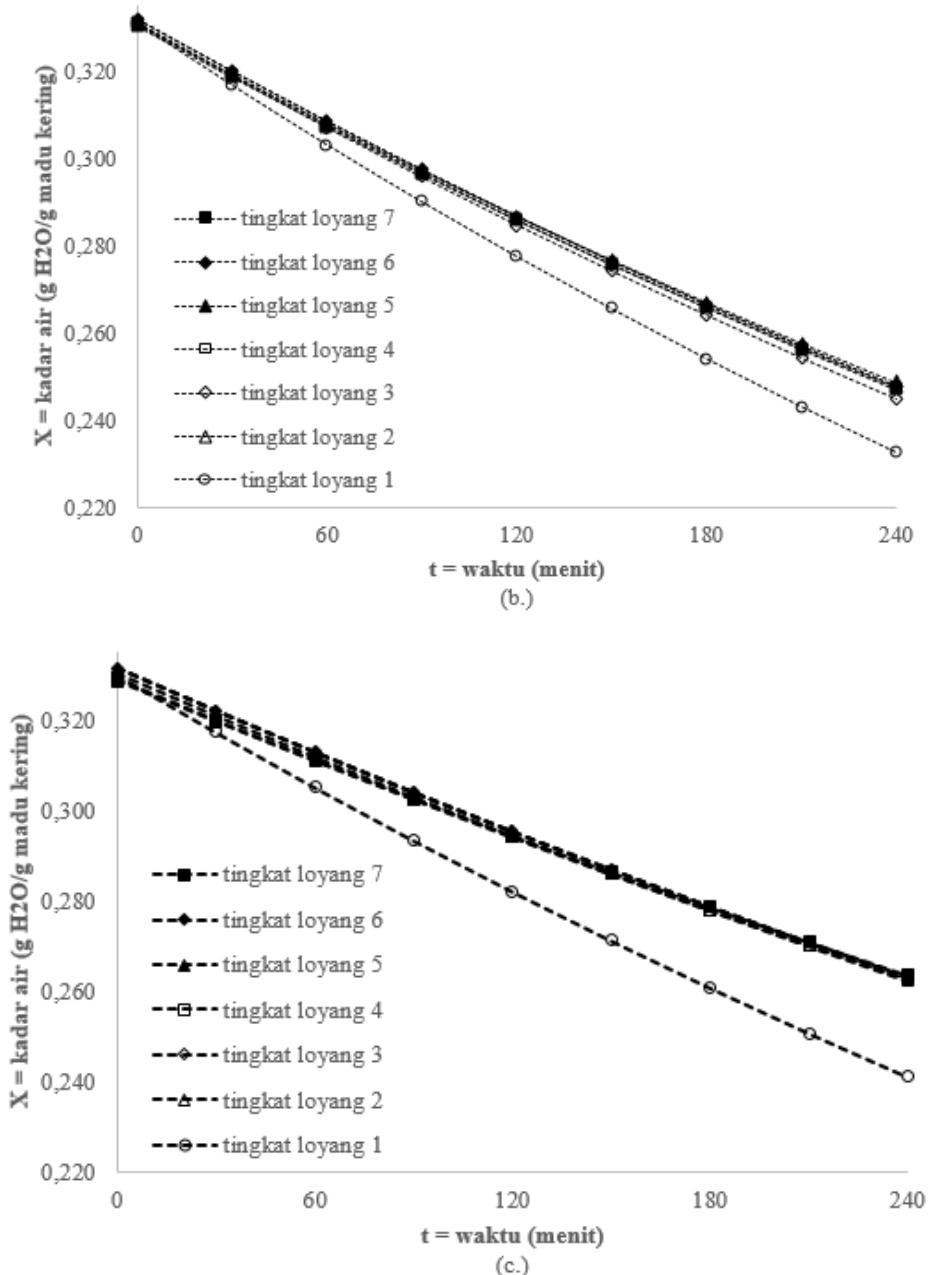
$$\frac{dX}{dt} = -\frac{A}{S_g} \cdot \frac{X - X_e}{X_{cr} - X_e} \cdot k_y \cdot (y^* - y_G), \quad (5)$$

Nilai k_y tidak diukur langsung melalui percobaan, sehingga perlu dilakukan optimasi (*parameter fitting*) dengan membandingkan data hasil percobaan dengan model matematisnya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses dehidrasi tujuh tingkat loyang madu pada dehidrator tipe kabinet terbantu gelombang ultrasonik dengan pengondisian yang sama diamati dalam penelitian. Data percobaan dehidrasi madu yang didapat adalah hubungan kadar air dalam bahan (X) pada interval waktu (t) dan pengondisian suhu tertentu dalam tiga variasi ketebalan sampel madu. Profil perubahan kadar air dalam bahan sebagai fungsi waktu disajikan pada Gambar (2) (a.), (b.), dan (c.).





**Gambar 2 Grafik hubungan kadar air madu terhadap waktu pada variasi tebal madu
(a.) $0,208 \text{ cm}$ (b.) $0,417 \text{ cm}$ (c.) $0,625 \text{ cm}$**

Penurunan kadar air madu terjadi selama periode dehidrasi. Dehidrasi pada awal periode relatif lebih cepat dibanding akhir periode. Cepatnya proses dehidrasi ditunjukkan melalui penurunan kadar air, dan massa air yang diuapkan. Pada variasi tebal madu $0,208 \text{ cm}$ yang tersaji pada Gambar (2.a.), madu mengalami penurunan kadar air $0,0234 \text{ g H}_2\text{O/g}$ madu kering, dan penguapan sebanyak $8,1 \text{ g}$ air untuk tingkat loyang 1, dan penurunan kadar air $0,0173 \text{ g H}_2\text{O/g}$ madu kering, dan penguapan sebanyak $5,9 \text{ g}$ air untuk tingkat loyang 2 sampai dengan 7 pada awal periode (30 menit akhir dehidrasi).

Pada variasi tebal madu $0,417 \text{ cm}$ yang tersaji pada Gambar (2.b.), madu mengalami penurunan kadar air $0,0143 \text{ g H}_2\text{O/g}$ madu kering, dan penguapan sebanyak $9,8 \text{ g}$ air untuk tingkat loyang 1, dan penurunan kadar air

pertama dehidrasi). Penguapan berlanjut hingga madu mengalami penurunan kadar air $0,0141 \text{ g H}_2\text{O/g}$ madu kering, dan penguapan sebanyak $4,9 \text{ g}$ air untuk tingkat loyang 1, dan penurunan kadar air $0,0119 \text{ g H}_2\text{O/g}$ madu kering, dan penguapan sebanyak $4,1 \text{ g}$ air untuk tingkat loyang 2 sampai dengan 7 pada akhir periode (30 menit akhir dehidrasi).

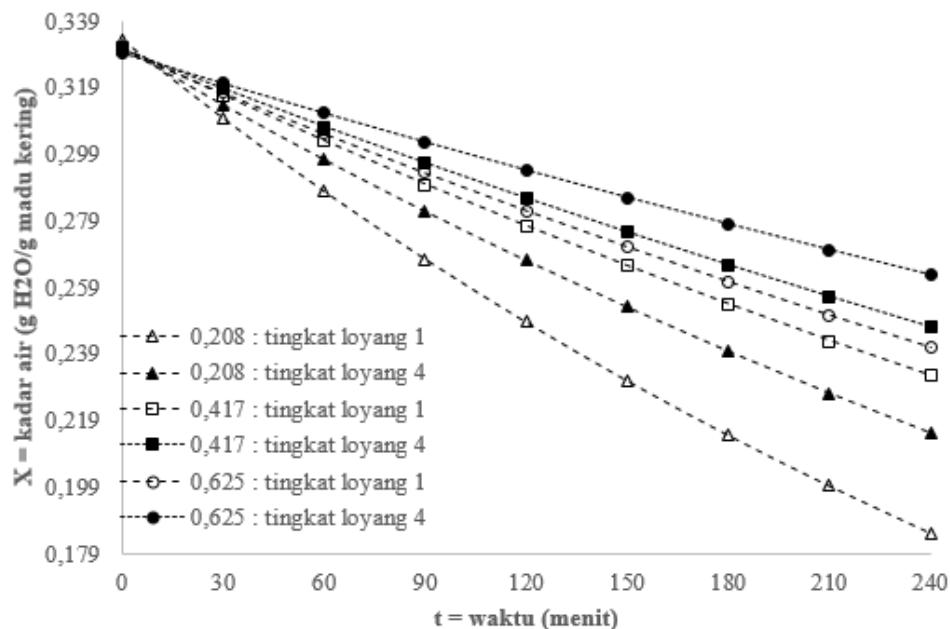
Pada variasi tebal madu $0,625 \text{ cm}$ yang tersaji pada Gambar (2.c.), madu mengalami penurunan kadar air $0,0143 \text{ g H}_2\text{O/g}$ madu kering, dan penguapan sebanyak $9,8 \text{ g}$ air untuk tingkat loyang 1, dan penurunan kadar air

0,0119 g H₂O/g madu kering, dan penguapan sebanyak 8,2 g air untuk tingkat loyang 2 sampai dengan 7 pada awal periode (30 menit pertama dehidrasi). Penguapan berlanjut hingga madu mengalami penurunan kadar air 0,0105 g H₂O/g madu kering, dan penguapan sebanyak 7,2 g air untuk tingkat loyang 1, dan penurunan kadar air 0,0092 g H₂O/g madu kering, dan penguapan sebanyak 6,3 g air untuk tingkat loyang 2 sampai dengan 7 pada akhir periode (30 menit akhir dehidrasi).

Pada variasi tebal madu 0,625 cm yang tersaji pada Gambar (2.c), madu mengalami penurunan kadar air 0,0132 g H₂O/g madu kering, dan penguapan sebanyak 13,2 g air untuk tingkat loyang 1, dan penurunan kadar air 0,0094 g H₂O/g madu kering, dan penguapan sebanyak 9,7 g air untuk tingkat loyang 2 sampai dengan 7 pada awal periode (30 menit

di permukaan bahan lebih rendah dibandingkan dengan konsentrasi massa air dalam bahan (Amin dkk., 2018). Penguapan air pada awal proses dehidrasi yang lebih besar juga disebabkan karena meningkatnya temperatur udara pengering sehingga bahan memiliki kemampuan lebih besar untuk melepaskan air dari permukaan (Novrinaldi dan Putra, 2019).

Air yang diuapkan selama proses dehidrasi pada variasi tebal madu lebih tinggi (volum lebih tinggi) cenderung lebih banyak dibanding pada variasi tebal madu lebih rendah. Namun berbanding terbalik dengan penurunan kadar air yang cenderung lebih tinggi pada variasi tebal madu lebih rendah. Secara umum ketiga variasi tebal madu mengalami penurunan kadar air yang cenderung menurun pada setiap waktunya. Sehingga proses dehidrasi madu terjadi dalam periode laju menurun (*falling rate period*).



Gambar 3 Grafik hubungan kadar air madu terhadap waktu pada variasi tebal madu untuk tingkat loyang 1, dan 4

pertama dehidrasi). Penguapan berlanjut hingga madu mengalami penurunan kadar air 0,0097 g H₂O/g madu kering, dan penguapan sebanyak 10,0 g air untuk tingkat loyang 1, dan penurunan kadar air 0,0077 g H₂O/g madu kering, dan penguapan sebanyak 7,8 g air untuk tingkat loyang 2 sampai dengan 7 pada akhir periode (30 menit akhir dehidrasi).

Jumlah air yang lebih banyak diuapkan pada awal periode dehidrasi disebabkan perbedaan konsentrasi massa air pada bagian permukaan, dan dalam bahan. Yaitu konsentrasi massa air

Pada setiap *batch* yang membedakan variasi tebal madu dapat teramatih bahwa terdapat kesamaan pola dehidrasi pada tingkat loyang 2 sampai dengan 7. Adapun proses dehidrasi selama 240 menit untuk tingkat loyang 2 sampai dengan 7 berhasil menurunkan kadar air dari 0,33 g H₂O/g madu kering berturut-turut pada variasi tebal madu 0,208 cm, 0,417 cm, dan 0,625 cm berturut-turut menjadi 0,22 g H₂O/g madu kering, 0,25 g H₂O/g madu kering, dan 0,26 g H₂O/g madu kering. Sedangkan proses dehidrasi untuk tingkat loyang 1 berhasil

menurukan kadar air pada variasi 0,208 cm, 0,417 cm, dan 0,625 cm berturut-turut menjadi 0,19 g H₂O/g madu kering, 0,23 g H₂O/g madu kering, dan 0,24 g H₂O/g madu kering.

Pada Gambar (3) tersaji grafik hubungan kadar air madu terhadap waktu untuk tingkat loyang 1, dan 4 yang mewakili penurunan kadar air pada tingkat loyang 2 sampai dengan 7. Teramati bahwa grafik yang mewakili tebal madu lebih rendah memiliki gradien paling curam. Hal ini menunjukkan penurunan kadar air pada bahan yang relatif lebih rendah terjadi lebih cepat pada pengondisian dehidrasi yang sama. Penurunan kadar air pada bahan lebih tipis cenderung lebih cepat disebabkan karena jumlah air yang diuapkan lebih sedikit.

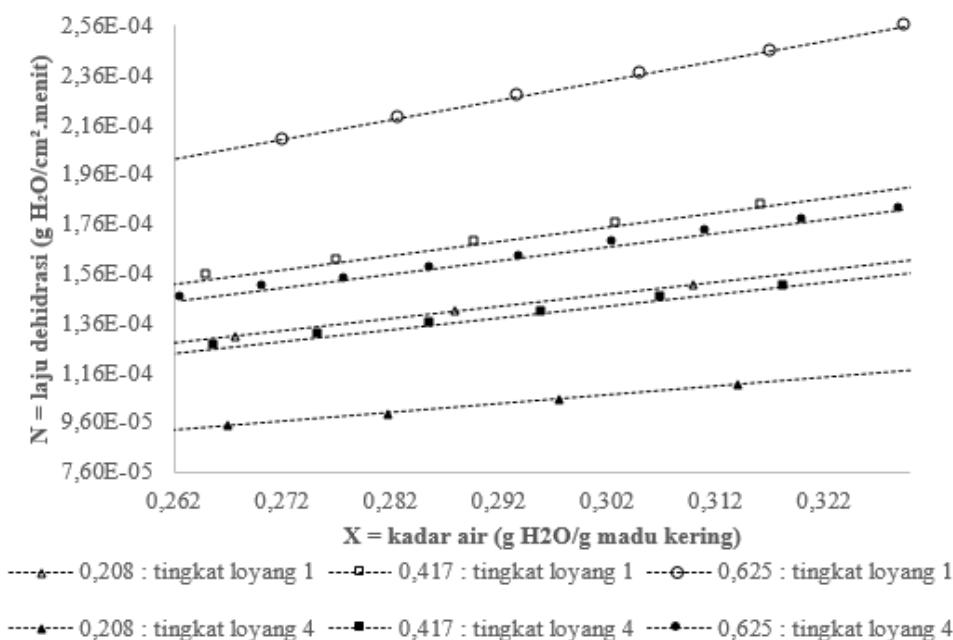
Selain pengaruh tebal madu, Gambar (3) juga menunjukkan fenomena menarik pada dehidrasi di tingkat loyang 1, dan 4. Pada setiap *batch* variasi tebal madu teramati bahwa setiap sampel madu yang diletakan di tingkat loyang 1 mengalami penurunan kadar air lebih cepat dibandingkan tingkat loyang lainnya.

Pada proses dehidrasi madu terjadi 2 peristiwa perpindahan kalor, yaitu konduksi, dan konveksi. Sejatinya proses dehidrasi bahan dalam mesin pengering tipe kabinet memanfaatkan perpindahan panas konveksi. Udara panas yang mengalir ke dalam ruang dehidrator dipaparkan mengenai bahan yang kemudian akan membawa uap air. Namun perpindahan panas secara konduksi juga dapat terjadi jika terdapat media yang memungkinkan terjadinya konduksi. Sampel madu pada tingkat loyang 1 mengalami penurunan kadar air relatif lebih cepat. Hal ini dapat terjadi mengingat tingkat loyang 1 merupakan tingkat loyang terbawah yang terletak paling dekat dengan elemen pemanas. Panas dari elemen pemanas mampu memanaskan loyang tingkat pertama

lebih optimal dibandingkan pada tingkat loyang 2 sampai dengan 7. Panas yang diterima untuk menguapkan air pada tingkat loyang 1 lebih tinggi karena mendapat panas berlebih dari peristiwa konduksi, sehingga penguapan air lebih cepat meskipun menerima panas yang sama melalui peristiwa konveksi seperti pada tingkat loyang 2 sampai dengan 7.

Secara umum, proses dehidrasi madu pada dehidrator tipe kabinet terbantu ultrasonik mendapatkan hasil cukup positif. Waktu penurunan kadar air madu relatif lebih cepat dibanding beberapa penelitian yang disimulasikan dalam sejumlah rujukan, seperti penurunan kadar air dengan metode sistem berkondensor oleh Amanto dkk. (2012), metode dehidrator vakum oleh Johanes dan Yohanes (2015), dan metode *adsorption drying* oleh Maliaentika dkk. (2016). Hasil menunjukkan proses dehidrasi pada dehidrator ultrasonik yang disimulasikan dapat menghemat waktu hingga 8 jam.

Kinetika dehidrasi dijelaskan melalui laju dehidrasi dengan menghitung gradien kadar air dalam bahan (dX) terhadap waktu (dt). Profil dehidrasi dapat diamati dari grafik hubungan laju dehidrasi terhadap fungsi kadar air. Pada Gambar (4) tersaji grafik hubungan laju dehidrasi madu terhadap kadar air. Grafik disajikan pada rentang dengan setiap tingkat loyang pada variasi tebal madu dapat teramati. Grafik yang tersaji menggambarkan profil dehidrasi pada variasi tebal madu untuk tingkat loyang 1, dan 4 yang mewakili tingkat loyang 2 sampai dengan 7.



Gambar 4 Grafik hubungan laju dehidrasi madu terhadap kadar air pada variasi tebal madu

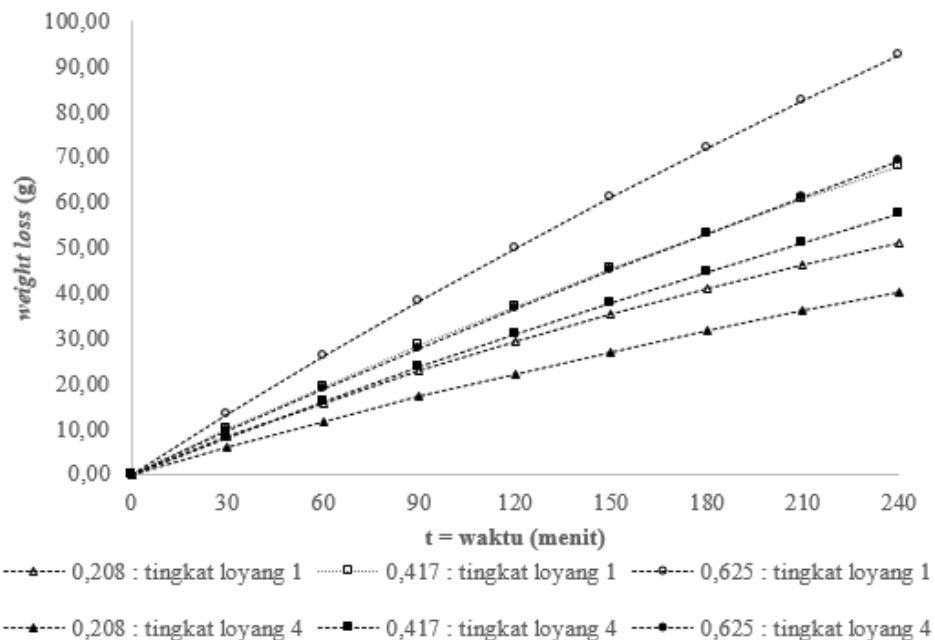
Laju dehidrasi menunjukkan banyaknya air yang diuapkan per satuan waktu (Ummah dkk., 2016). Laju dehidrasi dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk suhu, kelembapan, dan ukuran bahan yang dikeringkan. Laju dehidrasi akan menurun seiring penurunan kadar air selama proses dehidrasi. Hal ini ditunjukkan oleh gradien grafik dX/dt yang bernilai negatif. Sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 3, proses dehidrasi madu cenderung menurun seiring berkurangnya kadar air.

Pada awal proses dehidrasi, yaitu kondisi awal kadar air 0,33 g H₂O/g madu kering, masing-masing tingkat loyang pada variasi tebal madu menunjukkan profil dehidrasi yang khas. Laju dehidrasi pada awal proses dehidrasi untuk loyang 1 pada variasi tebal madu 0,208 cm, 0,417 cm, dan 0,625 cm berturut-turut adalah $1,63 \times 10^{-4}$ g H₂O/cm².menit, $1,92 \times 10^{-4}$ g H₂O/cm².menit, dan $2,56 \times 10^{-4}$ g H₂O/cm².menit. Adapun laju dehidrasi pada awal proses dehidrasi untuk loyang 4 pada variasi tebal madu 0,208 cm, 0,417 cm, dan 0,625 berturut-turut adalah $1,17 \times 10^{-4}$ g H₂O/cm².menit, $1,56 \times 10^{-4}$ g H₂O/cm².menit, dan $1,82 \times 10^{-4}$ g H₂O/cm².menit. Laju dehidrasi terus menurun seiring berkurangnya kadar air.

Pada jangkauan 0,262 g H₂O/g madu kering sampai dengan 0,330 g H₂O/g madu kering,

pola grafik tidak saling berpotongan sehingga dapat dengan mudah mengetahui perbandingan laju untuk setiap tingkat loyang pada variasi tebal madu. Sampel madu dengan tebal lebih rendah memiliki laju dehidrasi lebih tinggi dibanding tebal yang lebih tinggi. Adapun sampel madu pada tingkat loyang 1 memiliki laju dehidrasi lebih tinggi dibandingkan madu pada tingkat loyang 4. Hal yang menarik yang tersaji dalam grafik adalah sampel madu yang relatif lebih tebal pada tingkat loyang 1 memiliki laju dehidrasi yang lebih tinggi dibanding sampel madu yang relatif lebih tipis pada tingkat loyang 4. Hal ini menunjukkan betapa optimalnya proses dehidrasi yang terjadi akibat peristiwa konduksi.

Laju dehidrasi terjadi lebih tinggi pada variasi tebal madu yang lebih tinggi. Konsentrasi air bebas lebih tinggi pada variasi tebal madu yang lebih tinggi sehingga menyebabkan air mudah naik ke permukaan untuk diuapkan. Semakin banyak air yang diuapkan per satuan waktu tidak lantas menjadikan kadar air bahan menjadi lebih cepat turun. Hal ini dikarenakan definisi kadar air itu sendiri yang merupakan proporsi antara massa air dalam bahan, dan massa bahan keringnya.

**Gambar 5 Grafik hubungan weight loss terhadap waktu**

Salah satu konsekuensi proses dehidrasi adalah hilangnya massa (*weight loss*) sebagai dampak dari perpindahan massa dari bahan ke udara. Gambar (5) menyajikan grafik hubungan *weight loss* terhadap waktu. Seiring berjalannya proses dehidrasi, perpindahan massa air dari madu ke udara terus berlangsung. Berkurangnya massa air inilah yang menyebabkan kadar air madu berkurang. Pada ukuran bahan dikeringkan yang sama, air yang hilang lebih tinggi pada laju dehidrasi yang relatif lebih tinggi pula. Menurunnya laju dehidrasi seiring menurunnya kadar air tergambar dalam grafik *weight loss* yang semakin melandai seiring berjalananya waktu.

Koefisien transfer massa dapat dibangun untuk menjelaskan fenomena perpindahan massa air dari bahan ke udara pada proses dehidrasi. Pada penelitian dehidrasi madu ini, koefisien transfer massa dijadikan gambaran untuk menentukan proses dehidrasi paling optimal.

Tabel 1. Nilai k_y untuk setiap tingkat loyang pada variasi tebal madu

Tingkat Loyang	$k_y (\times 10^{-3} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{menit})$		
	0,208 cm	0,417 cm	0,625 cm
1	1,21	1,42	1,87
2	0,87	1,15	1,32
3	0,87	1,18	1,33

4	0,87	1,13	1,33
5	0,87	1,12	1,32
6	0,87	1,15	1,32
7	0,87	1,15	1,28

Tabel (1.) berisi rangkuman koefisien transfer massa hasil dari *parameter fitting* dengan $R^2 = 0,98$. Nilai k_y memiliki karakteristik khas untuk setiap pengondisian. Nilai k_y meningkat seiring bertambahnya tebal madu. Adapun tingkat loyang 1 yang mendapatkan panas optimal dari peristiwa konduksi memiliki nilai k_y lebih tinggi dibanding tingkat loyang 2 sampai dengan 7. Nilai koefisien transfer massa pada proses dehidrasi menunjukkan hasil yang serupa dengan grafik laju dehidrasi pada Gambar 4. Waktu dehidrasi (Gambar 2), laju dehidrasi (Gambar 4.), dan koefisien transfer massa (Tabel 1.) saling terkait karena lamanya waktu dehidrasi bergantung pada banyak air yang diuapkan per satuan waktu, dan ukuran (massa, dan volum) bahan yang dikeringkan.

4. KESIMPULAN

Kadar air tujuh tingkat loyang madu berhasil diturunkan dengan dehydrator tipe kabinet terbantu gelombang ultrasonik.

Simulasi proses dehidrasi selama 240 menit menunjukkan kadar air madu turun lebih cepat relatif dibanding metode dehidrasi yang dijadikan rujukan. Kadar air madu dengan variasi tebal paling rendah mengalami penurunan paling cepat. Profil dehidrasi ditinjau dari laju dehidrasi menunjukkan bahwa sampel madu dengan variasi tebal madu paling tinggi mengalami dehidrasi paling cepat. Selain konveksi, konduksi juga terlibat pada proses dehidrasi madu. Sampel madu yang diletakan paling dekat dengan elemen pemanas memiliki laju dehidrasi paling cepat.

Dehidrasi madu terjadi bersamaan dengan transfer massa dari madu ke udara ditunjukkan dengan hilangnya massa madu seiring berjalannya proses dehidrasi. Profil koefisien transfer massa menunjukkan hal yang serupa dengan laju dehidrasi. Sampel madu dengan variasi tebal paling tinggi yang diletakan dekat elemen pemanas memiliki nilai koefisien paling tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Amanto, B. S., P., N. R., dan Basito. (2012). Kajian Karakteristik Alat Pengurangan Kadar Air Madu dengan Sistem Vakum yang Berkondensor. *Jurnal Teknologi Hasil Pertanian*, V(2).
- Amin, S., Jamaluddin, dan Rais, M. (2018). Laju Pindah panas dan Massa pada Proses Pengeringan Gabah Menggunakan Alat Pengering Tipe Bak (Batch Dryer). *Jurnal Pendidikan Teknologi Pertanian*, 4, 87–104.
- Asiah, N., dan Djaeni, M. (2021). *Konsep Dasar Proses Pengeringan Pangan*. AE Publishing. <http://aepublishing.id>
- Badan Standardisasi Nasional. (2018). *SNI 8664:2018 Madu*. Badan Standardisasi Nasional. www.bsn.go.id
- Chemat, F., Zill-E-Huma, dan Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), 813–835. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>
- Codex Alimentarius Commission. (2019). *Standard for Honey CXS 12-1981, Rev. 1 (1987), Rev. 2 (2001), Amend. (2019)*.
- de la Fuente-Blanco, S., Riera-Franco de Sarabia, E., Acosta-Aparicio, V. M., Blanco-Blanco, A., dan Gallego-Juárez, J. A. (2006). Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, 44, 523–527. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2006.05.181>
- Evahelda, E., Pratama, F., dan Santoso, B. (2018). Sifat Fisik dan Kimia Madu dari Nektar Pohon Karet di Kabupaten Bangka Tengah, Indonesia. *Agrotech*, 37(4), 363. <https://doi.org/10.22146/agrotech.16424>
- Harmen, T. P. B., dan Sebastian, Y. (2013). Menaikkan Kadar Madu Sistem Spraying dalam Ruang Panas. *Jurnal Ilmiah Teknik Pertanian*, 5, 193–202.
- Hawkins, J., De Vere, N., Griffith, A., Ford, C. R., Allainguillaume, J., Hegarty, M. J., Baillie, L., dan Adams-Groom, B. (2015). Using DNA metabarcoding to identify the floral composition of honey: A new tool for investigating honey bee foraging preferences. *PLoS ONE*, 10(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0134735>
- Herjanto, E. (2011). Pemberlakuan SNI Secara Wajib di Sektor Industri Efektifitas dan Berbagai Aspek dalam Penerapannya. *Jurnal Riset Industri*, V(2), 121–130.
- Johanes, I. K., dan Yohanes. (2015). Penurunan Kadar Air Madu dengan Dehidrator Vakum. *Jurnal Online Mahasiswa FTEKNIK*, 2(1), 1–5.
- Maliaentika, S., Yuwono, S. S., dan Wijayanti, N. (2016). Optimasi Penurunan Kadar Air Madu Metode Adsorption Drying dengan Surface Response Methodology (RSM). *Jurnal Pangan Dan Agroindustri*, 4(2), 505–514.
- Muslim, T. (2014). Potensi Madu Hutan dan Pengelolaannya di Indonesia. *Prosiding Seminar Balitek KSDA*, 67–82.
- Novrinaldi, dan Putra, S. A. (2019). Pengaruh Kapasitas Pengeringan terhadap Karakteristik Gabah Menggunakan Swirling Fluidized Bed Dyer (SFBD). *Jurnal Riset Teknologi Industri*, 13(2), 111–124.
- Savitri, E., Prayitno, A., dan Hadi, S. (2019). Peningkatan Kualitas Madu dari Kampung Madu Lumbang Probolinggo dengan Penerapan Teknologi Dehumidifikasi. *SEMNAS ABDIMAS*.
- Sihombing, D. T. H. (2005). *Ilmu Ternak Lebah Madu*. Gadjah Mada University Press.
- Treybal, R. E. (1981). *Mass Transfer Operation* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Ummah, N., Purwanto, Y. A., dan Suryani, A. (2016). Penentuan Konstanta Laju Pengeringan Bawang Merah (*Allium ascalonicum* L) Iris Menggunakan Tunnel

Dehydrator. *Journal of Agro-Based Industry*, 33(2), 49–56