

SIMULASI PEMERKIRAAN PARAMETER SIFAT FISIKAWI BAHAN MAKANAN DENGAN METODE PENJEJAK PARAMETER

B. Rahardjo *)

*) B. Rahardjo adalah Staf Pengajar Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Gadjah Mada, Bulaksumur, Yogyakarta

ABSTRACT

Simulation of the parameter tracking method was used to estimate the physical parameters of food material. The input-output relationships of the materials were based on known mathematical models. Three mathematical models of the food properties were studied: the Kelvin model of linear viscoelastic material, the power law of non Newtonian liquid, and the impact model of a non linear viscoelastic spherical object. The results indicated that the parameter tracking method can determine the parameters of the models correctly. However the speed of the estimation depends on the models. The estimation of the parameters of the linear model converged faster than that of non linear models.

PENDAHULUAN

Rancangan sistem pengolahan makanan memerlukan parameter fisikawi bahan yang akan diolah. Parameter fisikawi bahan makanan merupakan dasar perhitungan rancangan tersebut. Kecepatan aliran makanan cair dalam pipa ditentukan oleh parameter rheologis cairan. Demikian juga pemanasan bahan makanan ditentukan oleh sifat penghantaran panas dalam bahan maupun dari media pemanas ke bahannya. Disamping itu parameter fisikawi sering digunakan sebagai kontrol mutu bahan olahan. Banyak usaha telah dijalankan untuk menghubungkan hasil uji sensoris (uji subyektif) dengan parameter fisikawi secara langsung maupun tak langsung (uji obyektif). Kekentalan es krim yang dinyatakan dengan viskositas kenampakannya (*apparent viscosity*) sering digunakan sebagai petunjuk kualitas kenikmatan pengunyahannya disamping kualitas rasanya. Demikian pula kesegaran buah segar pada saat dikunyah sering dihubungkan dengan elastisitas daging buahnya. Untuk itu banyak penelitian yang mencoba menghubungkan antara kenikmatan pengunyahan bahan makanan dengan viskositas kenampakan serta dengan elastisitasnya. Keranuman buah yang terlihat oleh indera mata dicoba dihubungkan dengan parameter tumbukan buah dengan pelat rata yang hasilnya diharapkan dapat digunakan untuk dasar pengembangan sistem pemilahan buah ranum.

Metode pengukuran parameter fisikawi banyak tersedia dalam pustaka (Lewis, 1987; Peleg dan Bagley,

1983; Rao dan Rizvi, 1986). Umumnya pengukuran parameter bahan makanan dilaksanakan dengan mengukur peubah bebas dan peubah tak bebas. Kemudian parameter hubungan kedua peubah tersebut dihitung dengan metode statistik yang sesuai dengan model matematika hubungan kedua peubah. Doebelin (1980) membahas metode penjejak parameter untuk mengestimasi parameter suatu sistem yang telah diketahui model matematika hubungan antara masukan dan keluarannya. Parameter sistem ditentukan dengan menggunakan sinyal masukan dan keluaran dari sistem secara berkesinambungan. Keberhasilan perhitungan tersebut tergantung pada ketepatan pemilihan model matematika sistem dan model matematikanya sendiri. Informasi yang tersedia terbatas pada model matematika linier dan dengan peubah tak bebas tunggal. Oleh karena itu tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari kemungkinan penggunaan metode penjejak parameter untuk mencari parameter beberapa model matematika sifat fisikawi bahan makanan dan mencari faktor yang menentukan keberhasilan serta ketepatan metode tersebut.

LANDASAN TEORI

Parameter fisikawi suatu bahan makanan merupakan parameter yang menentukan hubungan antara perlakuan yang dikenakan pada bahan dan tanggapan dari bahan tersebut. Bentuk hubungan antara perlakuan dan tanggapan tersebut secara empiris dapat dikemukakan dengan suatu bentuk model matematika. Bilamana bentuk model matematika tersebut telah diketahui, maka hubungan tersebut dapat dikemukakan sebagai hubungan antara masukan (input) dan keluaran (output) pada suatu sistem. Kedua masukan dan keluaran tersebut akan berupa sinyal yang gayut dengan waktu atau masing-masing dinyatakan sebagai $X(t)$ dan $F(t)$. Kedua peubah tersebut dihubungkan oleh suatu fungsi yang mengandung parameter a dan secara matematis dapat dikemukakan sebagai berikut:

$$F(t) = f(a, X) \quad (1)$$

Bilamana parameter a dari model suatu sistem tersebut belum diketahui atau belum ditentukan, maka keluaran dari sistem tersebut dapat diperkirakan dengan menggunakan pemeriksa parameter $\alpha(t)$. Perkiraan keluaran dari sistem dapat dikemukakan sebagai:

$$\Pi(t) = f(\alpha, X) \quad (2)$$

Pada awalnya perkiraan $\Pi(t)$ tidak akan sama dengan nilai $F(t)$, sehingga karenanya terjadi kesalahan pemerkiraan $E(t)$ yang dapat dikemukakan sebagai berikut:

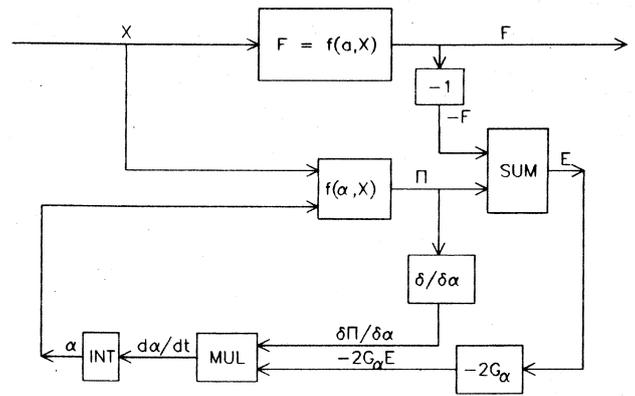
$$E(t) = \Pi(t) - F(t) \quad (3)$$

Pemerkiraan parameter $\alpha(t)$ akan mengalami perubahan. Laju perubahan pemerkiraan parameter tersebut diberikan berupa persamaan sebagai berikut (Doebelin, 1986):

$$\begin{aligned} \frac{d\alpha}{dt} &= -G_a \frac{\partial E^2}{\partial \alpha} \\ &= -2G_a \frac{\partial \Pi}{\partial \alpha} (\Pi - F) \end{aligned} \quad (4)$$

Integrasi persamaan (4) akan menghasilkan persamaan pemerkiraan parameter $\alpha(t)$ sebagai fungsi waktu. Hasil integrasi tersebut menunjukkan bahwa untuk selang waktu t yang cukup lama pemerkiraan parameter $\alpha(t)$ akan konvergen ke a . Kelerengan $\partial E^2 / \partial \alpha$ pada kurve hubungan antara E^2 dengan α adalah sedemikian rupa sehingga untuk t yang cukup lama akan menyebabkan pemerkiraan $\alpha(t)$ akan konvergen ke a . Namun keberhasilan konvergensi ini tergantung pada bentuk model matematika $f(a, X)$ (Doebelin, 1986). Penyelesaian analitis persamaan (4) untuk model matematika berbentuk linier menunjukkan bahwa pemerkiraan $\alpha(t)$ akan konvergen ke a (Rahardjo, 1993). Namun untuk bentuk model matematika yang tak linier masih perlu dikaji lebih lanjut.

Untuk simulasi metode penjejak parameter penyelesaian persamaan (4) dilakukan secara numerik. Langkah rinci simulasi penyelesaian persamaan tersebut disajikan sebagai diagram pada Gambar 1. Pada diagram tersebut ditunjukkan bahwa pemerkiraan berlangsung secara berkesinambungan sampai tercapai pemerkiraan yang konstan selama masih tersedia sinyal masukan dan keluaran. Pemerkiraan tersebut dapat diawali dengan menggunakan sembarang nilai awal pemerkiraan parameter.



Gambar 1. Skema simulasi untuk pemerkiraan parameter a suatu sistem dengan masukan X dan keluaran F

BAHAN DAN CARA PENELITIAN

Bahan

Simulasi penjejak parameter dilakukan pada tiga model matematika hubungan antara masukan dan keluaran. Ketiga model matematika tersebut meliputi model viskoelastik linier Kelvin, model hukum berpangkat (*power law*) untuk cairan tak Newtonian dan model tumbukan jatuh bebas antara viskoelastik dengan bidang keras dan rata.

Model Viskoelastik Linier Kelvin

Model viskoelastik linier Kelvin mempunyai dua parameter. Model matematika ini dapat ditunjukkan sebagai berikut:

$$F(t) = BV(t) + kX(t) \quad (5)$$

Masing-masing parameter B dan k model persamaan (5) dapat diperkirakan dengan pemerkiraan parameter $\beta(t)$ dan $k(t)$. Pemerkiraan keluaran dengan menggunakan kedua pemerkiraan tersebut akan berupa:

$$\Pi = \beta V(t) + kX(t) \quad (6)$$

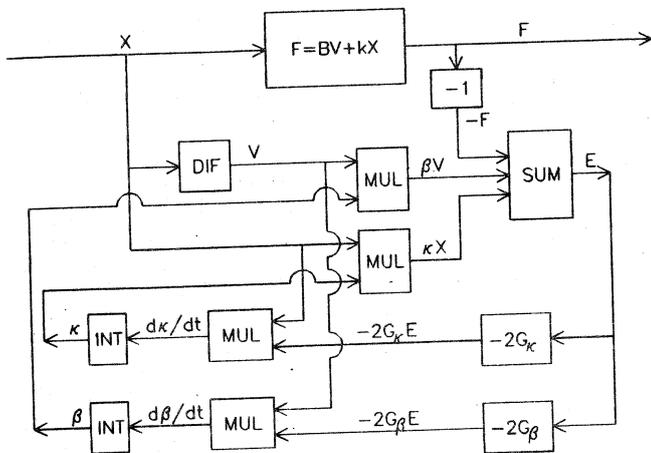
Sesuai dengan persamaan (4) laju perubahan pemerkiraan parameter $\beta(t)$ akan berupa:

$$\frac{d\beta}{dt} = -2G_\beta V (\Pi - F) \quad (7)$$

Demikian juga pemerkiraan parameter $k(t)$ akan berubah dengan laju yang berupa persamaan sebagai berikut:

$$\frac{d_k}{dt} = -2 G_k X (\Pi - F) \quad (8)$$

Berdasarkan persamaan (7) dan (8) disusun skema simulasi pemerkiraan parameter model linier Kelvin seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema simulasi pemerkiraan parameter model viskoelastik linier Kelvin

Model Hukum Berpangkat untuk Cairan Tak Newtonian

Hukum berpangkat (*power law*) untuk cairan tak Newtonian mempunyai dua parameter yang dapat ditunjukkan sebagai berikut:

$$\tau = m \gamma^n \quad (9)$$

Dengan melakukan operasi logaritma di kedua belah persamaan (9) akan mengubah bentuk tak linier menjadi bentuk linier yang dapat dikemukakan sebagai berikut:

$$\log(\tau) = \log(m) + n \log(\gamma) \quad (10)$$

Bentuk persamaan (10) mirip dengan bentuk persamaan (5) sehingga tahapan pemerkiraan akan sama dengan pemerkiraan model linier Kelvin. Untuk itu model berpangkat ini dicoba dicari parameternya seperti model linier dengan mengoperasikan logaritma seperti persamaan (10). Disamping itu pemerkiraan

parameter hukum berpangkat akan dilakukan dengan persamaan (9) tanpa dengan operasi logaritma terlebih dahulu. Untuk itu koefisien konsistensi m dan indeks aliran n diperkirakan dengan pemerkiraan $\mu(t)$ dan $\nu(t)$. Dengan demikian pemerkiraan keluaran persamaan (9) akan berupa:

$$\Pi = \mu \gamma^\nu \quad (11)$$

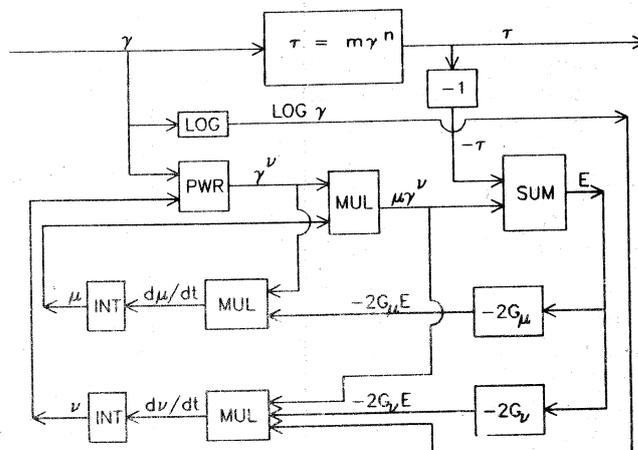
Laju pemerkiraan $\mu(t)$ sesuai dengan persamaan (4) akan berupa:

$$\frac{d\mu}{dt} = -2 G_\mu \gamma^\nu (\Pi - \tau) \quad (12)$$

Demikian juga pemerkiraan parameter $\nu(t)$ akan berupa:

$$\frac{d\nu}{dt} = -2 G_\nu \log(\gamma) \mu \gamma^\nu (\Pi - \tau) \quad (13)$$

Skema simulasi pemerkiraan parameter model hukum berpangkat disusun berdasarkan kedua persamaan (12) dan (13) dan ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema simulasi pemerkiraan parameter rheologi hukum berpangkat untuk k cairan tak Newtonian

Model Tumbukan Bola Visoelastik Tak Linier dengan Bidang Datar

Gaya tumbukan bola terbuat dari bahan viskoelastik dengan bahan keras datar dimodelkan dengan persamaan tak linier (Lichtensteiger, 1982). Dalam model tersebut gaya tumbukan ini merupakan jumlah dari gaya pegas dan gaya viskus. Konstan pegas gayut dengan

deformasi yang terjadi sehingga karenanya gaya pegas tidak linier dengan deformasi. Sedangkan faktor peredam merupakan bilangan tetap yang gayut dengan deformasi, oleh karena itu gaya viskus juga tidak linier dengan kecepatan tumbuk. Berdasarkan hal itu model tumbukan ini dapat ditunjukkan sebagai persamaan berikut:

$$F = B \text{Abs}(X) V + k X^n \quad (14)$$

Lichtensteiger (1982) lebih lanjut menguraikan perhitungan kecepatan tumbuk V dan deformasi tumbukan X dari gaya tumbukan dengan menggunakan kecepatan awal tumbukan. Kecepatan awal tumbuk tersebut ditentukan berdasarkan tinggi jatuh bebas benda karena gravitasi.

Model persamaan (14) mempunyai tiga parameter B , k dan n . Dengan menggunakan pemeriksa β , k dan ν untuk masing-masing parameter keluaran model persamaan (12) akan berupa:

$$\Pi = \beta \text{Abs}(X) V + k X^n \quad (15)$$

Sesuai dengan persamaan (4), laju pemerkiraan $\mu(t)$ akan berupa:

$$\frac{d\beta}{dt} = -2 G_\beta \text{Abs}(X) V(\Pi - F) \quad (16)$$

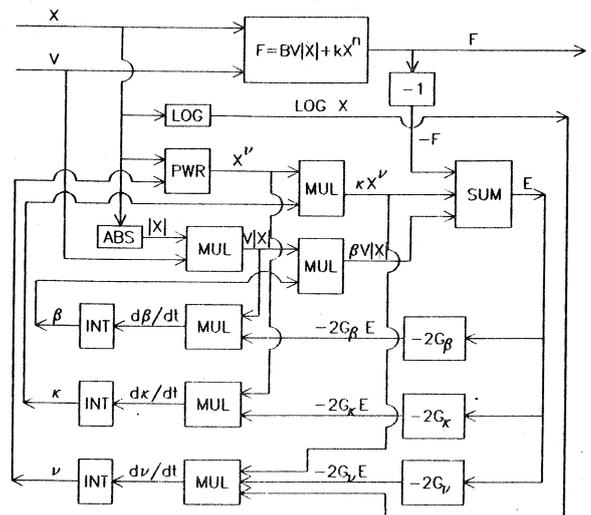
Demikian juga untuk pemerkiraan parameter $k(t)$ akan berupa:

$$\frac{dk}{dt} = -2 G_k X^n (\Pi - F) \quad (17)$$

Sedangkan untuk pemerkiraan $\nu(t)$ akan berupa:

$$\frac{d\nu}{dt} = -2 G_\nu \log(X) k X^n (\Pi - F) \quad (18)$$

Dengan menggunakan persamaan (16), (17) dan (18) skema tahapan simulasi pemerkiraan parameter model tumbukan dapat disusun dan diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema simulasi pemerkiraan parameter model tumbukan bola viskoelastik tidak linier dengan permukaan keras dan rata

Prosedur Simulasi

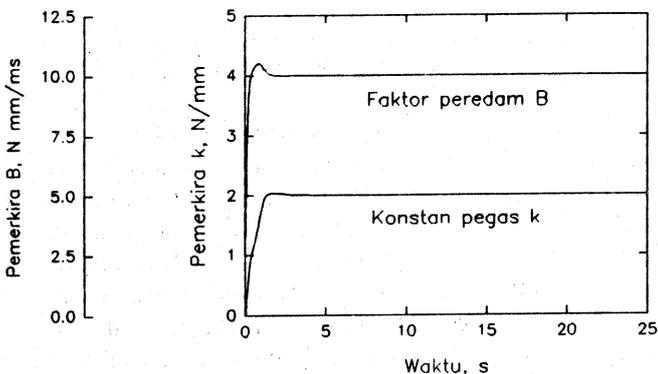
Simulasi metode penjejak parameter dilakukan dengan program simulasi yang ada (Tutsim, Applied i, Palo Alto, CA, USA). Simulai dilakukan dengan menggunakan data yang dihitung berdasarkan model yang sesuai dan dengan menggunakan parameter yang tersedia di pustaka (Lichtensteiger, 1982; Mohsenin, 1970; Rahardjo, 1992). Parameter yang digunakan untuk model linier Kelvin adalah $B = 40 \text{ N ms/mm}$ dan $k = 2 \text{ N/mm}$ yang merupakan sebetuk parameter buah segar. Sebagai masukan untuk model ini berupa deformasi x dan sebagai keluaran berupa gaya F . Sedangkan laju deformasi V dicari dengan mendefereensialkan deformasi X . Untuk model hukum berpangkat digunakan koefisien konsistensi m sebesar 40 mPa^n dan indeks aliran n sebesar 0.80 yang merupakan parameter rheologi larutan 0.2% berat karboksil-metil-selulose. Sesuai dengan modelnya, masukan berupa laju regangan geser dan keluaran berupa tegangan geser. Sedangkan untuk parameter tumbukan digunakan parameter umumnya buah segar yaitu $B = 54 \text{ N ms/mm}^2$, $k = 33 \text{ N/mm}^n$ dan $n = 2.2$. Untuk model ini masukan berupa deformasi X dan laju deformasi V serta keluaran berupa gaya tumbuk F . Simulasi dilakukan dengan menggunakan data yang dihasilkan dari perhitungan tersebut sampai pemerkiraan parameter konvergen ke nilai parameter yang diberikan.

Laju pemerkiraan tergantung pada nilai bilangan konstan G (Doebelin, 1986). Dengan bertambah besar

bilangan kontans G akan mempercepat laju konvergensi pemerkira parameter. Namun dalam beberapa kasus dengan nilai G yang besar justru menyebabkan pemerkira parameter akan bergoyang dan tidak akan konvergen. Untuk itu dalam simulasi dilakukan dengan beberapa bilangan konstan G atau dengan menggunakan bilangan konstan G yang berbeda untuk masing-masing pemerkira. Simulasi juga dilakukan dengan menggunakan beberapa nilai awal pemerkira parameter. Diamati pengaruh G dan nilai awal parameter terhadap laju konvergensi pemerkiranya.

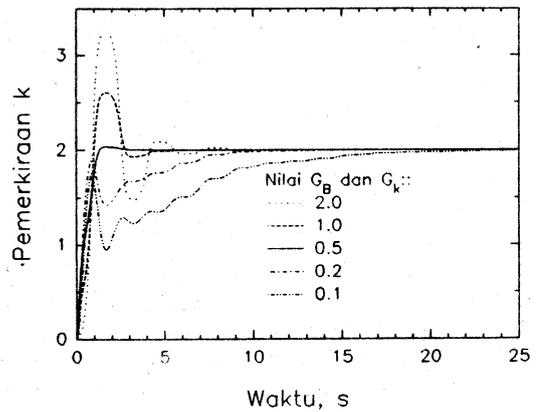
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemerkiraan parameter model viskoelastik linier Kelvin dengan menggunakan G_B dan G_k masing-masing sebesar 0.5 berlangsung seperti dalam kurva yang diperlihatkan pada Gambar 5. Untuk model linier metode penjejak parameter dapat mencari kedua parameter tersebut dengan baiknya. Pemerkira parameter $\beta(t)$ dan $k(t)$



Gambar 5. Hasil simulasi pemerkiraan parameter model viskoelastik linier Kelvin. Pemerkiraan digunakan G_B dan G_k sebesar 0.5 dan tanpa dengan nilai awal pemerkira

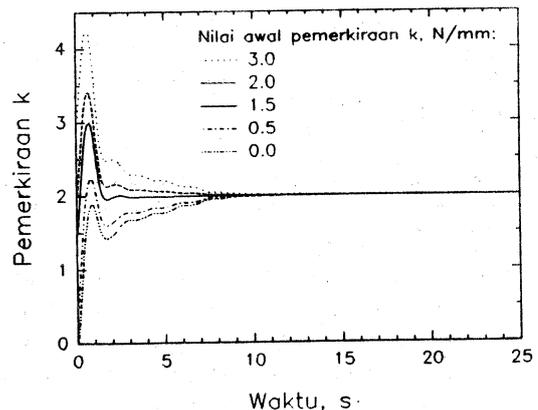
dapat konvergen ke nilai parameter yang dicarinya atau yang digunakan menghitung data untuk simulasi. Konvergensi pemerkiraan sangat dipengaruhi oleh harga G_B dan G_k yang digunakan. Makin besar harga kedua G konvergensi kedua pemerkira parameter akan makin cepat (Gambar 6). Namun penggunaan kedua G yang terlalu besar menyebabkan ketidak stabilan dalam pemerkiraan yang ditunjukkan dengan semakin besarnya goyangan pemerkiraan. Dengan kedua G diatas 2.0 pemerkiraan berlangsung sangat tidak stabil dan akhirnya menyebabkan program terhenti. Kemungkinan terhentinya eksekusi program adalah terlalu besarnya bilangan yang melebihi kapasitas memori komputer. Agar pemerkiraan berjalan dengan cepat dan aman perlu dicari G yang sesuai. Namun belum dijumpai sistematika pemilihan G yang sesuai dengan modelnya,



Gambar 6. Pengaruh penggunaan konstan G_B dan G_k yang berbeda terhadap laju perubahan pemerkira dan konvergensi ke nilai parameternya

sehingga karenanya pemilihan G hanya dilakukan dengan secara coba-coba.

Laju konvergensi pemerkira juga ditentukan oleh nilai awal pemerkira atau awal pendugaan parameter. Nilai awal pemerkira yang semakin mendekati nilai parameter yang dicarinya maka laju konvergensi juga akan semakin cepat. Walaupun konvergensinya lebih lambat, nilai awal pemerkira yang terlalu rendah maupun yang terlalu tinggi tetap akan konvergen ke nilai parameter yang dicari (Gambar 7). Dari hasil tersebut nampak bahwa nilai awal yang optimal adalah sekitar 80% dari nilai parameter yang dicarinya.



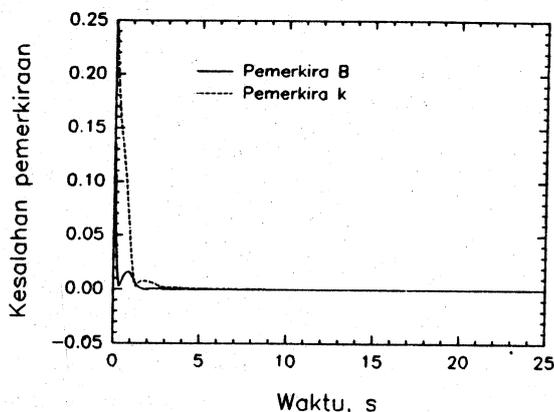
Gambar 7. Pengaruh penggunaan nilai awal pemerkira pada laju perubahan dan kovergensi ke nilai parameternya pada kedua G sama dengan 0.2

Gabungan pemakaian G yang sesuai dan dengan nilai awal pemerkira akan mempercepat pencarian nilai parameternya. Nisbah kesalahan pemerkiraan parameter dapat diartikan sebagai perbandingan kesalahan

pemeriksaan parameter dengan nilai parameter yang dicarinya atau dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$E_p = Abs \left[\frac{a - \alpha(t)}{a} \right] \quad (19)$$

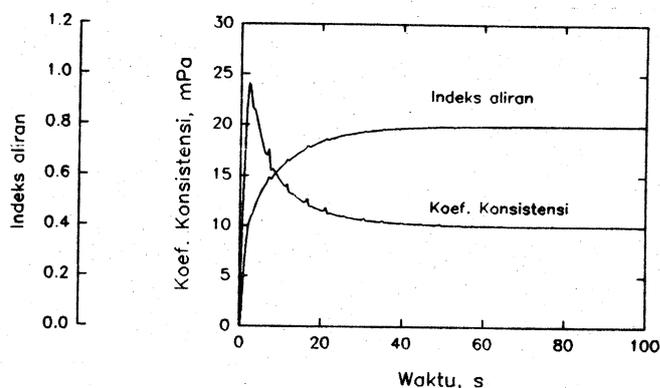
Kesalahan pemeriksaan kedua parameter dengan menggunakan $G_b = 0.5$ dan $G_k = 0.5$ dan dengan nilai awal pemeriksa sebesar 80% dari nilai parameter yang dicari ditunjukkan pada Gambar 8. Pada Gambar 8 terlihat bahwa pemeriksaan dengan kesalahan kurang dari 5% dapat dicapai setelah pemeriksaan berlangsung kurang dari 4 sekon waktu komputer atau sekitar 400 kali ulangan pemeriksaan. Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa pemeriksaan parameter model linier dengan metode penjejak parameter berlangsung dengan cepat. Dalam penerapan model ini dapat dijumpai pada pengukuran regangan tarik atau tekan untuk bahan viskoelastik bilamana kecepatan regangan tidak dapat diabaikan pengaruhnya. Dengan menggunakan sinyal regangan geser, laju tegangan kedua parameter akan dapat dicari dengan metode ini.



Gambar 8. Kesalahan pemeriksaan parameter dengan menggunakan G_b dan G_k sebesar 0.5 dan nilai awal 80% dari yang diberikan

Pemeriksaan parameter model hukum berpangkat dengan model matematika seperti persamaan (9) dan (10) dapat konvergen ke parameter yang dicarinya. Namun konvergensi model matematika tanpa dengan pengoperasian logaritma lebih cepat daripada konvergensi model matematika dengan pengoperasian logaritma. Agaknya program simulasi yang digunakan tidak dapat menangani bilangan yang terlalu besar sehingga dalam simulasi persamaan (9) dipakai satuan Pa untuk tegangan geser τ dan 1/ms untuk laju regangan geser $\dot{\gamma}$ agar masukan dan keluaran menjadi lebih kecil. Oleh karenanya parameter m yang dicarinya menjadi 10.4 Pa^n . Seperti halnya pada model linier, nilai G juga mem-

pengaruhi kecepatan konvergensi dan kestabilan pemeriksaan. Untuk model ini dengan persamaan (9) nilai G_μ dan G_ν yang sesuai didapatkan masing-masing sebesar 1.0 dan 0.005. Dengan menggunakan kedua konstant tersebut, konvergensi pemeriksaan kedua parameter hukum berpangkat berlangsung cepat dan stabil (Gambar 9). Dibandingkan dengan model linier, konvergensi model hukum berpangkat lebih lambat.

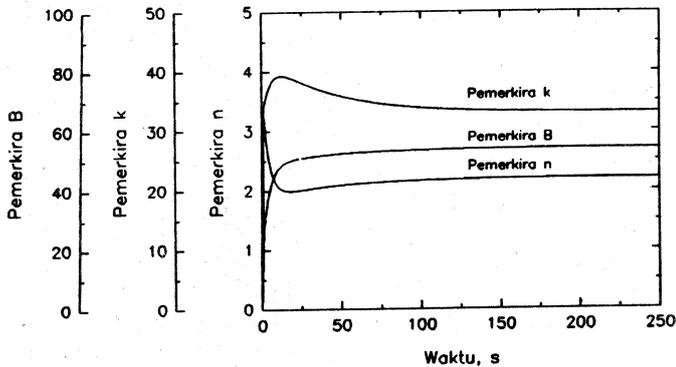


Gambar 9. Hasil simulasi pemeriksaan parameter rheologi hukum berpangkat untuk cairan tak Newtonian

Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa pada sifat rheologis cairan tak Newtonian dapat dicari dengan metode penjejak parameter. Dengan memasukkan sinyal regangan geser dan laju regangan kedua parameter rheologis dapat dicarinya. Hal ini juga memungkinkan dilakukan pengukuran sifat tersebut secara berkesinambungan. Dengan mengukur regangan geser dan laju regangan secara berkesinambungan sebagai masukan ke sistem pengukuran berdasarkan metode ini maka akan dapat ditayangkan keadaan sifat rheologis cairan yang diamati secara berkesinambungan. Metode penjejak parameter akan dapat mengikuti perubahan sifat rheologis cairan dengan baik.

Simulasi pemeriksaan parameter model tumbukan bola viskoelastik tidak linier menunjukkan konvergensi ke parameter yang dicarinya. Dalam hal ini nilai G juga mempengaruhi kecepatan konvergensi dan kestabilan pemeriksaan seperti pada kedua model sebelumnya. Dalam model matematika tak linier seperti halnya hukum berpangkat dan tumbukan, perubahan G untuk pangkat lebih menentukan dalam perubahan laju pemeriksaan dibandingkan dengan G untuk parameter lainnya. Nilai G_b , G_k dan G_μ yang sesuai dalam pencarian ketiga parameter tumbukan didapatkan masing-masing sebesar 0.5, 0.5 dan 0.005. Dengan menggunakan ketiga konstant tersebut, konvergensi pemeriksaan ketiga parameter model tumbukan berlangsung cukup cepat dan

aman seperti ditunjukkan pada Gambar 10. Dibandingkan dengan kedua model linier dan model hukum berpangkat, konvergensi model tumbukan adalah paling lambat. Agaknya semakin kompleks bentuk model matematik suatu sistem metode penjejak parameter akan semakin lambat mencari parameteranya. Bagaimanapun juga, untuk kasus model tumbukan, metode ini mampu mencari ketiga parameteranya cukup dengan menggunakan satu set data tumbukan.



Gambar 10. Hasil simulasi pemerkiraan model tumbukan bola viskoelastik tak linier dengan permukaan keras dan datar

Jatuh tumbukan telah banyak dicoba untuk memilahkan tingkat keranuman buah. Cara yang ada memerlukan beberapa kali tumbukan dengan variasi kecepatan awal tumbukan. Metode penjejak parameter dapat mencari ketiga parameter viskoelastik buah dengan data gaya satu kali tumbukan. Dengan menghubungkan ketiga parameter tersebut dengan tingkat keranuman buah hasil pengamatan indrawi penglihatan, metode tersebut dapat dikembangkan sebagai cara pemilahan buah. Namun masih perlu diteliti bagaimana mengusahakan perhitungan yang lebih cepat sehingga keranuman dapat ditentukan pada saat selesainya tumbukan. Penelitian lanjut penerapan metode penjejak parameter masih diperlukan.

KESIMPULAN

Metode penjejak parameter dapat digunakan dengan baik untuk menemukan parameter model viskoelastik linier, model hukum berpangkat dan model tumbukan bola viskoelastik. Pemerkiraan parameter ketiga model dapat berlangsung dengan singkat. Semakin besar nilai G akan mempercepat pemerkiraan parameter. Namun pemakaian G yang terlalu besar dapat menyebabkan pemerkiraan tidak stabil dan simulasi terhenti. Demikian pula dengan pemakaian nilai awal pemerkiraan akan mempercepat konvergensi pemerkiraan

ke parameter yang dicarinya. Disamping itu laju konvergensi dipengaruhi oleh bentuk model matematikanya, makin sederhana bentuk modelnya akan makin cepat konvergensi pemerkiraan. Masih diperlukan penelitian lanjut untuk menerapkan metode penjejak tersebut.

DAFTAR SIMBUL

- a : parameter dari model matematika.
- B : faktor peredam, Nmm/ms atau Nmm^2/ms .
- E : kesalahan estimasi, N atau mPa .
- F : gaya, N .
- f : fungsi.
- G : bilangan konstan positif.
- k : konstan pegas, N/mm atau N/mm^n .
- m : koefisien konsistensi, Pa^n atau mPa^n .
- n : indeks aliran
- t : waktu, ms .
- V : laju deformasi, mm/ms .
- X : deformasi, mm .
- α : pemerkiraan a.
- β : pemerkiraan B, Nmm/ms atau Nmm^2/ms .
- γ : laju regangan geser, $1/s$ atau $1/ms$.
- k : pemerkiraan k, N/mm atau N/mm^n .
- μ : pemerkiraan m, mPa .
- θ : pemerkiraan n.
- Π : perkiraan keluaran, N atau mPa .
- τ : tegangan geser, Pa atau mPa .

DAFTAR PUSTAKA

- Doebelin, Ernest O., 1980. System Modeling and Response. Theoretical and Experimental Approaches, John Wiley & Sons. New York.
- Lewis, M. J., 1987. Physical Properties of Foods and Food Processing Systems. Ellis Horwood International Publisher in Science and Technology. Great Britain.
- Lichtensteiger, M. J., 1982. Impact and Analysis of Viscoelastic Spheres, Fruits and Vegetables with Rigid, Plane Surfaces. Disertasi Ph.D. The Ohio State University. Columbus, Ohio, USA.
- Mohsenin, Nuri N., 1970. Physical Properties of Plant and Animal Materials. Vol. 1. Gordon and Breach Science Publishers. New York.
- Peleg, Micha dan Bagley, Edward B., 1983. Physical Properties of Foods. AVI Publishing Company, Inc. Westport.
- Rahardjo, B., 1992. Analyses of Damage of Food Particles During Pumping. Disertasi Ph.D. The Ohio State University. Columbus, Ohio, USA.
- Rahardjo, B., 1993. Model Matematika Metode Penjejak Parameter Sebagai Pemerkiraan Parameter Fisika Bahan Makanan. Agritech 13(1): 14 - 19.
- Rao, M. A. dan Rizvi, S. S. H., 1986. Engineering Properties of Foods. Marcel Dekker, Inc. New York.