



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

P/MA/1991/0149

IPB	
KAMPUS BOGOR	
NO. SURAT	1991
TANGGAL	1991

MODEL PENDUGAAN LAJU PEMBEKUAN DAGING KAMBING DENGAN METODA BEDA HINGGA



Oleh
DIAN SARI SUDARSONO MURTI
F 23 0867



1991
FAKULTAS TEKNOLOGI PERTANIAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR

Dian Sari Sudarsono Murti. F 23. 0867. Model Pendugaan Laju Pembekuan Daging Kambing Dengan Metoda Beda Hingga. Di bawah bimbingan Putiati Mahdar dan Bambang Pramudya.

RINGKASAN

Skripsi ini merupakan hasil penelitian yang dilakukan di Bangsal Percontohan Pengolahan Hasil Pertanian dan di Laboratorium Teknik Pengolahan Pangan dan Hasil Pertanian, Jurusan Mekanisasi Pertanian, Institut Pertanian Bogor.

Penelitian ini mempunyai tujuan :1) menentukan perkembangan sifat-sifat termofisik daging kambing selama pembekuan, dan 2) menyusun model simulasi komputer untuk menduga laju pembekuan daging kambing dalam bentuk lempengan-datar tak terhingga dengan metoda beda hingga.

Pengukuran laju pembekuan daging kambing dilakukan dengan menggunakan alat pembeku "air blast freezer". Daging kambing yang diukur penurunan suhunya tersebut dibuat berbentuk balok dengan ukuran 100 x 100 mm dan dengan tiga macam ketebalan, yaitu 1 cm, 2 cm dan 3 cm. Suhu ruangan pada "air blast freezer" sebesar -27.2°C .

Model numerik yang digunakan adalah model numerik skema Crank Nicholson. Perhitungan model numerik dilakukan pada setiap interval waktu (Δt) dengan menggunakan jumlah interval jarak (Δx) yang berbeda-beda untuk tiap ketebalan sedemikian hingga mempunyai jarak yang sama





ketebalan sedemikian hingga mempunyai jarak yang sama antar titik numerik. Untuk ketebalan satu cm, jumlah interval jaraknya lima buah, dua cm sebanyak 10 buah dan untuk ketebalan tiga cm sebanyak 15 buah. Perhitungan dihentikan setelah suhu pusat ketebalan daging mencapai -18°C .

Perbandingan antara kurva penurunan suhu pusat daging kambing hasil percobaan pembekuan terhadap hasil pendugaan numerik pada umumnya menunjukkan kesesuaian arah dan laju pembekuan. Periode "precooling" dari masing-masing ketebalan mempunyai arah dan laju hasil pendugaan yang mendekati arah dan laju pembekuan hasil pengukuran. Begitu juga halnya dengan periode perubahan fase. Pada periode "tempering" kurva perbandingan menunjukkan sedikit perbedaan. Untuk ketebalan satu cm dan tiga cm hasil pendugaan bersifat "under estimate" sedang ketebalan dua cm bersifat "over estimate".

Persentase simpangan lama waktu pembekuan hasil pendugaan numerik terhadap data hasil pengukuran percobaan untuk ketebalan satu cm adalah 6.5 persen, ketebalan dua cm sebesar 3.3 persen dan ketebalan tiga cm adalah sebesar 4.8 persen. Ketelitiannya masih dalam batas yang dapat diterima.

Model simulasi komputer pendugaan laju pembekuan ini dapat diterapkan untuk menentukan kondisi pembekuan yang optimum sehingga mencapai laju pembekuan yang diinginkan.

@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Laju pembekuan yang cepat akan menghasilkan kualitas produk beku yang lebih baik.

Laju pembekuan rata-rata yang dihitung dari hasil pendugaan ternyata besarnya < 1 cm/jam, jadi termasuk dalam katagori pembekuan lambat. Untuk mendapatkan laju pembekuan sedang sampai cepat ($w > 1$ cm/jam), suhu optimum medium pembekuan yang diperlukan adalah sebesar -80°C atau lebih rendah lagi.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

MODEL PENDUGAAN LAJU PEMBEKUAN DAGING KAMBING DENGAN METODA BEDA HINGGA

Oleh

DIAN SARI SUDARSONO MURTI

F 23. 0867

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar

SARJANA TEKNOLOGI PERTANIAN

pada Jurusan **MEKANISASI PERTANIAN**

Fakultas Teknologi Pertanian

Institut Pertanian Bogor

1991

FAKULTAS TEKNOLOGI PERTANIAN

INSTITUT PERTANIAN BOGOR

BOGOR

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

INSTITUT PERTANIAN BOGOR
FAKULTAS TEKNOLOGI PERTANIAN

MODEL PENDUGAAN LAJU PEMBEKUAN DAGING KAMBING
DENGAN METODA BEDA HINGGA

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
SARJANA TEKNOLOGI PERTANIAN
pada Jurusan MEKANISASI PERTANIAN
Fakultas Teknologi Pertanian
Institut Pertanian Bogor

Oleh

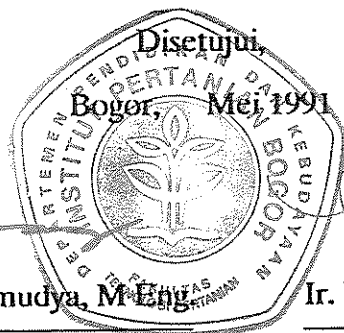
DIAN SARI SUDARSONO MURTI

F 23. 0867

Dilahirkan pada tanggal 24 Januari 1968

di Surakarta

Tanggal lulus : April 1991



Dr. Ir. Bambang Pramudya, M.Eng

Dosen Pembimbing II

Ir. Putiati Mahdar M App. Sc.

Dosen Pembimbing I

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Swt, karena hanya dengan rahmat-Nya maka penulis dapat menyusun skripsi ini hingga selesai.

Rasa terima kasih yang setulusnya penulis ucapkan kepada:

1. Ir. Putiati Mahdar, M. App. Sc. sebagai dosen pembimbing utama
2. Dr. Ir. Bambang Pramudya, M. Eng. atas saran dan bantuan yang diberikan selaku dosen pembimbing pendamping
3. Ir. Suroso, atas kesediaannya sebagai anggota tim penguji
4. Ir. Agus Margiwiyatno yang telah banyak membantu selama penelitian
5. M. Khirzuddin yang banyak membantu dalam penyusunan skripsi dan Mas Rosikhun yang telah membantu penelitian.
6. Sahabat, teman, teman serumah dan semua pihak yang telah memberikan bantuan yang tidak dapat disebut satu persatu.

Penulis menyadari mungkin masih banyak kekurangan yang ditemui dalam skripsi ini. Atas saran dan kritik membangun yang diberikan, penulis mengucapkan terima kasih.

Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini bermanfaat bagi yang memerlukannya.

Bogor, Mei 1991

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
DAFTAR SIMBOL.	xi
I. PENDAHULUAN	1
A. LATAR BELAKANG	1
B. TUJUAN PENELITIAN	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
A. DAGING KAMBING	5
B. PROSES PEMBEKUAN DAN LAJU PEMBEKUAN	9
III. PENDEKATAN TEORITIS	16
A. PENDUGAAN LAJU PEMBEKUAN DENGAN MODEL NUMERIK	16
B. PENURUNAN MODEL NUMERIK	21
C. PENYUSUNAN PROGRAM KOMPUTER	29
IV. METODA PENELITIAN	34
A. WAKTU DAN TEMPAT PENELITIAN	34
B. ALAT DAN BAHAN	34
C. PROSEDUR PENELITIAN	34
1. Pengukuran Data Masukan Program Komputer	34
2. Penentuan Sifat-Sifat Termofisik	39
3. Percobaan Pembekuan	39

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR ISI

	Halaman
V. HASIL DAN PEMBAHASAN	44
VI. KESIMPULAN DAN SARAN	62
A. KESIMPULAN	62
B. SARAN	63
DAFTAR PUSTAKA	64
LAMPIRAN	67

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR TABEL

	<u>Teks</u>	Halaman
Tabel 1.	Daya tahan bahan pangan segar	2
Tabel 2.	Data populasi Sapi, Domba dan Kambing di Indonesia tahun 1984-1988	6
Tabel 3.	Hubungan antara lama penyimpanan produk beku (bulan) dengan suhu "cold storage"	8
Tabel 4.	Data masukan program komputer	35
Tabel 5.	Data masukan lain yang diperlukan	36

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR GAMBAR

	<u>Teks</u>	Halaman
Gambar 1.	Arah aliran panas dalam lempengan tipis (slab)	17
Gambar 2.	Illustrasi elemen kecil di dalam lempengan tipis (slab) dengan ketebalan Δx	18
Gambar 3.	Diagram alir skema Crank-Nicholson untuk pembuatan program komputer menggunakan metoda beda hingga	33
Gambar 4.	Alat pengukur konduktifitas termal tipe "Probe"	38
Gambar 5.	Tampak luar alat pembeku "air blast freezer"	40
Gambar 6.	Bagian dalam alat pembeku "air blast freezer"	40
Gambar 7.	Susunan daging kambing, styrofoam dan pengukur suhu	42
Gambar 8.	Contoh potongan daging kambing yang telah diinsulasi dengan styrofoam	42
Gambar 9.	Susunan termometer digital selama pengukuran suhu pusat	43
Gambar 10.	Grafik perubahan nilai konduktifitas termal selama pembekuan hasil pendugaan numerik	51
Gambar 11.	Grafik perubahan panas jenis selama pembekuan hasil perhitungan numerik	52
Gambar 12.	Grafik perubahan massa jenis selama pembekuan hasil perhitungan numerik	53
Gambar 13.	Perbandingan kurva penurunan suhu pusat daging kambing hasil percobaan terhadap hasil pendugaan numerik (ketebalan 1 cm)	56

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dari menyebutkan sumber
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR GAMBAR

	<u>Teks</u>	Halaman
Gambar 14.	Perbandingan kurva penurunan suhu pusat daging kambing hasil percobaan terhadap hasil pendugaan numerik (ketebalan 2 cm)	57
Gambar 15.	Perbandingan kurva penurunan suhu pusat daging kambing hasil percobaan terhadap hasil pendugaan numerik (ketebalan 3 cm)	58

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Daftar simbol pada program komputer . . .	67
Lampiran 2. Data pengukuran massa jenis daging kambing pada beberapa titik suhu selama pembekuan	70
Lampiran 3. Data pengukuran kadar air daging kambing	71
Lampiran 4. Data pengukuran waktu dan suhu gliserol dengan metoda "Probe"	72
Lampiran 5. Contoh plot grafik ln waktu dan suhu gliserol	73
Lampiran 6. Contoh perhitungan konstanta C alat pengukur konduktifitas panas tipe "Probe" menggunakan gliserol.	74
Lampiran 7. Hasil perhitungan konstanta C alat pengukur konduktifitas panas tipe "Probe"	75
Lampiran 8. Data pengukuran suhu dan waktu daging kambing dengan metode "Probe"	76
Lampiran 9. Contoh plot grafik ln waktu dan suhu daging kambing	84
Lampiran 10. Contoh perhitungan konduktifitas panas daging kambing	85
Lampiran 11. Hasil perhitungan nilai konduktifitas termal daging kambing pada beberapa titik suhu selama pembekuan	86
Lampiran 12. Sifat-sifat termal daging kambing . . .	87
Lampiran 13. Data masukan program komputer	88
Lampiran 14. Program komputer model numerik untuk pendugaan laju pembekuan daging kambing	90
Lampiran 15. Penjelasan program komputer	96
Lampiran 16. Contoh hasil pendugaan numerik laju pembekuan daging kambing dengan ketebalan 1 cm	99

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 17. Contoh hasil pendugaan numerik laju pembekuan daging kambing dengan ketebalan 2 cm	100
Lampiran 18. Contoh hasil pendugaan numerik laju pembekuan daging kambing dengan ketebalan 3 cm	102
Lampiran 19. Perubahan sifat-sifat termal daging kambing hasil pendugaan numerik	104
Lampiran 20. Data percobaan pembekuan daging kambing dengan ketebalan 1 cm menggunakan "air blast freezer"	105
Lampiran 21. Data percobaan pembekuan daging kambing dengan ketebalan 2 cm menggunakan "air blast freezer"	107
Lampiran 22. Data percobaan pembekuan daging kambing dengan ketebalan 3 cm menggunakan "air blast freezer"	109
Lampiran 23. Persentase simpangan hasil pendugaan numerik (ketebalan daging 1 cm).	112
Lampiran 24. Persentase simpangan hasil pendugaan numerik (ketebalan daging 2 cm).	113
Lampiran 25. Persentase simpangan hasil pendugaan numerik (ketebalan daging 3 cm).	114

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR SIMBOL

Notasi

A
C_p
C_{po}
D
E
F
e
f
h
i
k
k_t
L
M
n
t
Δ t
T
T_o
T_a
T_f
T_i
T_p

- luas permukaan, m²
- panas jenis, kJ/kg K
- panas jenis tidak beku, kJ/kg K
- tebal lempengan tipis (slab), m
- konstanta pada persamaan (9)
- konstanta pada persamaan (9)
- konstanta pada persamaan (19)
- konstanta pada persamaan (20)
- koefisien pindah panas konveksi, W/m² K
- selang waktu dalam perhitungan numerik
- konduktifitas panas, W/m K
- variabel yang didefinisikan pada persamaan (14)
- panas laten pembekuan air, kJ/kg
- massa bahan, kg
- tingkat posisi dalam perhitungan numerik
- lama pembekuan, detik
- selang waktu dalam perhitungan numerik, detik
- suhu mutlak bahan yang dibekukan, K
- suhu pembekuan air murni, K
- suhu medium pendingin, °C
- suhu titik beku bahan, °C
- suhu bahan awal, °C
- suhu puncak pelepasan panas laten, °C

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Simbol Yunani

- Δx selang posisi dalam perhitungan numerik, m
- Y_0 kadar air bahan (basis basah)
- α difusifitas panas, $m^2/detik$
- α_k parameter yang didefinisikan pada persamaan (15)
- β parameter yang didefinisikan pada persamaan (16)
- σ parameter pada persamaan (10)
- λ parameter yang didefinisikan pada persamaan (13)
- λ^o_f panas kristalisasi air pada T_0 , J/kg
- ρ massa jenis, kg/m^3
- ω fraksi es

Subskrip

- a air
- h keadaan beku
- L paralel
- m matrik serat
- o keadaan awal
- p tegak lurus
- u tidak beku
- 1 indeks konstanta dalam persamaan (19) dan (20)
- 2 indeks konstanta dalam persamaan (19) dan (20)



I. PENDAHULUAN

A. LATAR BELAKANG

Daging adalah bahan pangan yang banyak mengandung protein yang sangat diperlukan oleh tubuh. Dalam penanganannya, komoditi daging tersebut mudah mengalami kerusakan, yaitu terjadi pembusukan dalam penyimpanannya. Kerusakan tersebut disebabkan karena komposisi gizinya yang baik dan kadar airnya yang tinggi, selain itu juga karena pencemaran permukaan pada daging oleh mikroorganisme perusak. Pada Tabel 1 dapat dilihat kemudah rusakan bahan pangan segar yang disimpan pada suhu kamar.

Oleh karena daging sangat mudah rusak pada suhu kamar, maka pengawetan sangat diperlukan untuk menjaga stabilitas penyimpanannya.

Salah satu cara pengawetan bahan pangan, dalam hal ini daging kambing dapat dilakukan dengan pembekuan. Menurut Desrosier (1987) pembekuan sebagai suatu teknologi pengawetan bahan pangan telah muncul beberapa dasawarsa yang lalu. Pembekuan ini sangat mendukung dan menunjang sebagian besar industri baru yaitu bahan pangan beku. Keberhasilan pembekuan pangan tersebut tergantung pada perkembangan dan baiknya pelaksanaan semua jaringan satelit pabrik-pabrik bahan pangan beku, penggudangan dan pusat-pusat distribusi serta adanya

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

tempat-tempat penyimpanan bahan pangan beku di pasar-pasar swalayan dan rumah-rumah.

Tabel 1. Daya tahan bahan pangan segar^a

Kemudah-rusakan (daya tahan dalam penyimpanan suhu kamar)	Kadar air	Produk
Sangat mudah rusak (1-7 hari)	sedang sampai tinggi	Jaringan ternak: daging, ayam, ikan laut Jaringan tanam- an: buah-buahan dan sayuran lu- nak dengan ting- kat respirasi yang tinggi Susu
Mudah rusak	sedang	Jaringan tanam- an : umbi-umbi- an, apel dan per yang ranum
Relatif tidak mudah rusak	rendah	Jaringan tanam- an : padi-padi- an, polong-po- longan kering), kacang-kacangan

^a Buckle et al. (1987)

Menurut Desrosier (1987) keuntungan pengawetan pangan dengan pembekuan diantaranya adalah dapat mengu-
rangi populasi mikrobia pada bahan pangan, tidak meru-
bah nilai gizi protein dan vitamin dan mematikan para-
sit yang terdapat pada bahan pangan tersebut.

Apabila pembekuan tidak dilakukan dengan seksama,
maka justru dapat menurunkan stabilitas dan daya simpan
dari bahan pangan yang dibekukan. Stabilitas dan daya

simpan daging yang dibekukan dipengaruhi oleh laju pembekuannya. Dengan demikian pendugaan terhadap laju pembekuan perlu dilakukan.

Laju pembekuan dapat diatur dan sangat menentukan sifat dan kualitas produk beku yang dihasilkan. Sifat produk yang diakibatkan oleh pembekuan cepat sangat berbeda dari produk yang dihasilkan dengan pembekuan lambat. Hal yang sangat berpengaruh terhadap perbedaan kualitas ialah mekanisme pembentukan kristal-kristal es diantara jaringan pangan beku. Selanjutnya, laju pembekuan juga berpengaruh terhadap volume produksi selama kurun waktu tertentu (Heldman dan Singh, 1981).

Pendugaan laju pembekuan dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai model, mulai dari model analitik yang relatif sederhana sampai metoda yang lebih teliti berupa model numerik yang memerlukan bantuan komputer.

Model numerik yang telah dikenal ada dua macam, yaitu 1) model numerik metoda beda hingga (finite difference) dan 2) model numerik metoda elemen terbatas (finite element). Dalam penelitian ini digunakan metoda beda hingga karena cara ini lebih tepat diterapkan untuk bahan dengan bentuk geometri yang sederhana. Selain itu juga lebih cepat memberikan hasil dan hanya membutuhkan sedikit memori komputer. Metoda finite element lebih tepat digunakan untuk bentuk geometri yang rumit.



Model numerik yang dipakai dalam pendugaan laju pembekuan daging kambing ini adalah model numerik dengan metoda beda hingga dari skema Crank-Nicholson yang tercantum dalam Mascheroni dan Calvelo (1982).

Dalam pendugaan laju pembekuan, terjadinya proses perpindahan panas yang disertai dengan perubahan fase dan perubahan sifat-sifat termofisik baan perlu diperhatikan agar hasil pendugaan sesuai dengan kondisi yang sebenarnya. Untuk itu dalam penelitian ini digunakan perubahan sifat-sifat termal yang telah dikembangkan oleh Mascheroni dan Calvelo (1982).

Penelitian ini memakai daging kambing sebagai bahan yang akan diuji karena jenis daging ini belum banyak dikaji. Untuk menguji ketepatan model maka perlu dilakukan percobaan lapang.

B. TUJUAN PENELITIAN

Berdasar permasalahan tersebut di atas, maka penelitian ini mempunyai tujuan sebagai berikut :

1. Menentukan perkembangan sifat-sifat termofisik daging kambing (densitas, konduktifitas termal dan panas spesifik) selama proses pembekuan.
2. Menyusun model simulasi komputer untuk menduga laju pembekuan daging kambing dalam bentuk lempengan datar tak terhingga dengan metoda beda hingga.



II. TINJAUAN PUSTAKA

A. DAGING KAMBING

Perkembangan peternakan kambing lebih lambat jika dibandingkan dengan domba, tetapi akhir-akhir ini peternakan kambing pernah mengalami kemajuan yang sangat berarti (Sumoprastowo, 1980).

Menurut Buckle et al. (1987) jenis-jenis kambing yang utama ditinjau dari segi ekonomis adalah: 1) kambing Kacang, 2) kambing Merica, 3) kambing Etawah (Jampari), 4) kambing Bali (Gembrong) dan 5) peranakan Etawah.

Di Indonesia, segi ekonomis yang dapat diperoleh dari ternak kambing selain kulitnya yang mempunyai arti cukup penting sebagai sumber devisa negara adalah dagingnya. Daging kambing lebih empuk daripada daging sapi dan kerbau, serat dagingnya lebih halus. Daging kambing mempunyai rasa dan aroma yang khusus yang digemari oleh kebanyakan orang. (Sumoprastowo, 1980). Pada Tabel 2 dapat dilihat data populasi kambing di Indonesia pada beberapa tahun terakhir.

Sebelum dilakukan penyembelihan perlu dilakukan pengawasan pada higiene pabrik dan setelah itu perlu dilakukan pendinginan pendahuluan sampai sekitar 15°C untuk mengurangi gejala pengerutan dingin, pengerutan kejang dan "thaw rigor" (Buckle et al., 1987).

Tabel 2. Data populasi Sapi, Domba dan Kambing di Indonesia tahun 1984-1988

Tahun	Jumlah (000)		
	Sapi	Domba	Kambing
1984	8 745.2	4 708.0	9 204.6
1985	9 105.5	4 885.2	9 629.0
1986	9 516.1	5 318.0	10 737.8
1987	9 509.2	5 362.7	10 392.8
1988	10 402.3	5 449.9	10 355.2

Sumber : Statistik Indonesia, BPS Jakarta

"Thaw rigor" adalah proses dimana reaksi enzimatik mulai bekerja kembali setelah daging beku dicairkan dan terjadinya bersama-sama dengan proses "rigor mortis". Proses enzimatik tersebut terhenti selama bahan pangan masih dalam kondisi beku. Hal ini disebabkan karena daging dibekukan sebelum proses "rigor mortis" terjadi dimana tingkat PH dan ATP masih cukup tinggi. Gejala "thaw rigor" ditunjukkan dengan mengerutnya otot daging sampai pada taraf pengerutan yang cukup banyak dan pada waktu itu juga mengeluarkan sejumlah besar cairan dalam bentuk tetesan yang berjumlah sampai 30-40 persen dari berat urat daging. Hal ini mungkin tidak merugikan bila daging yang sedang mencair dipotong dan digiling dengan bumbu-bumbu yang lain tapi harus dihindari bila daging akan dijual dalam kondisi beku. "Thaw rigor" ini dapat



dihindari dengan mendinginkan daging sampai kira-kira mencapai suhu 15°C dan daging dipertahankan pada suhu ini agar proses "rigor mortis" dapat berjalan sebelum produk itu dibekukan (Buckle et al., 1987).

Pengerutan dingin adalah pengerutan otot yang tidak begitu hebat yang terjadi bila daging sebelum mengalami "rigor mortis" didinginkan sampai suhu antara $0-15^{\circ}\text{C}$. Pengerutan dingin yang menyebabkan pengerutan otot karkas dapat dikurangi dengan tidak mendinginkan karkas tersebut di bawah suhu 15°C sebelum proses "rigor mortis" selesai (Buckle et al., 1987).

Pengerutan kejang adalah gejala dimana otot cenderung mengeras pada suhu di atas 15°C dengan kecepatan pengerutan yang dipengaruhi oleh tingkatan suhu (Buckle et al., 1987).

Karena adanya hal-hal di atas, maka pengawasan suhu yang ketat selama proses "rigor mortis" perlu dilakukan, yaitu dijaga pada suhu tidak lebih dan tidak kurang dari 15°C (sekitar $15-16^{\circ}\text{C}$).

Untuk melindungi bahan dari dehidrasi, maka harus dilakukan pengemasan (Desrosier, 1988). Karkas yang dibekukan dalam keadaan tidak terlindung dimungkinkan mengalami "freezer burn", yaitu timbulnya bercak-bercak berwarna keputihan atau warna batu amber yang terlihat pada permukaan daging beku. Bercak-bercak ini disebabkan karena sublimasi kristal-kristal es dari permukaan



daging ke dalam atmosfer tempat penyimpanan dingin, sehingga membuat kantong-kantong kecil berisi udara pada permukaan daging yang kadang-kadang membaurkan sinar. Hal ini dapat dicegah dengan penggunaan teknik pengemasan yang tepat (Buckle et al., 1987). Kemasan yang dipakai tersebut harus berfungsi melindungi bahan pangan, harus tahan terhadap penanganan yang bersifat mekanis, hemat ruangan, pemakaiannya harus praktis termasuk dari segi biayanya. Bahan-bahan kayu, logam, gelas dan kertas dapat dipakai sebagai wadah bahan pangan beku dengan hasil baik (Desrosier, 1987).

Bahan pangan yang telah dibekukan harus disimpan pada "cold storage" dengan suhu yang lebih rendah atau sama dengan suhu pada pusat termal bahan (Heldman dan Singh, 1981). Bratzler et al. dalam Desrosier dan Tressler (1977) mengemukakan hubungan antara lama penyimpanan produk beku dan suhu "cold storage". Hubungan tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hubungan antara suhu cold storage (oC) dengan lama penyimpanan produk beku (bulan)

Komoditi	12.2oC	-17.8oC	-23.3oC	-28.8oC
Daging sapi	4	6	12	12 ⁺
Daging kambing	3	6	12	12 ⁺
Daging babi	2	4	8	10

Sumber : Bratzler et al. dalam Desrosier dan Tressler (1977)



B. PROSES PEMBEKUAN DAN LAJU PEMBEKUAN

Berdasarkan definisi, pembekuan atau penyimpanan beku daging dilaksanakan pada suhu dimana mikroorganisma tidak akan tumbuh dan pada suhu dimana daging masih cukup keras dan tahan pada penimbunan besar-besaran. Dalam pelaksanaannya ini berarti penggunaan suhu di bawah -15°C (Buckle et al., 1987).

Menurut Tressler et al. (1981) fenomena yang terdapat dalam pembekuan adalah perubahan fase air dari keadaan cair menjadi beku. Pengaruh ini tidak terdapat pada proses pendinginan yang hanya mampu menurunkan mobilitas molekul yang tidak memungkinkan pengawetan untuk jangka lama.

Proses pembekuan terjadi secara bertahap dari permukaan sampai pusat termal bahan. Yang dimaksud dengan pusat termal bahan adalah suatu titik di dalam bahan dimana pembekuan berlangsung paling lambat (Brennan, 1981).

Brennan (1981) membagi proses pembekuan ke dalam tiga tahap, yaitu: tahap "precooling" bahan tidak beku, proses pembekuan (perubahan fase) dan tahap pendinginan bahan beku ("tempering").

Pada tahap "precooling" suhu bahan diturunkan dari suhu awal ke suhu titik beku. Menurut Desrosier (1988) titik beku suatu cairan adalah suhu di mana cairan



tersebut dalam keadaan seimbang dengan bentuk padatnya. Bahan pangan mempunyai titik beku yang lebih rendah dari pada air murni.

Pada tahap perubahan fase terjadi pembentukan kristal es (Heldman dan Singh, 1981). Fennema (1975) dalam Heldman dan Singh (1981) menyatakan bahwa pertumbuhan kristal dapat terjadi pada suhu di bawah titik hablur dan pertumbuhan kristal ini meningkat dengan menurunnya suhu sampai saatnya dicapai konsentrasi komponen terlarut relatif tinggi atau viskositas yang tinggi. Pembentukan kristal es terjadi pada interval suhu -1°C sampai -5°C (Ramaswamy dan Tung, 1984).

Menurut Buckle et al. (1987), daging seperti bahan biologis lain tidak mempunyai titik beku tertentu, akan tetapi mempunyai kisaran titik beku, jumlah air yang terdapat sebagai es ditentukan oleh rendahnya suhu. Jadi pada suhu 0°C tidak terdapat es, pada suhu -10°C kira-kira 83 persen dari air yang ada membeku dan pada -30°C kira-kira 89 persen beku dan baru pada suhu di bawah -40°C semua air yang ada membeku pada titik "eutectic".

Pada saat suhu berada di bawah titik beku, fraksi tertentu dari air masih berada dalam fase cair. Besarnya fraksi ini berkurang dengan menurunnya suhu. Namun demikian masih terdapat air yang tidak beku pada suhu yang sangat rendah (Brennan, 1981). Hal tersebut



disebabkan adanya dua macam air dalam bahan pangan, yaitu air terikat dan air bebas.

Sebagian menerima definisi air terikat sebagai air yang tidak dapat membeku pada suhu -5°F (Desrosier, 1987). Salah satu tipe air terikat adalah molekul air yang terikat pada molekul-molekul lain melalui suatu ikatan hidrogen yang berenergi tinggi. Molekul air membentuk hidrat dengan molekul lain yang mengandung atom O dan N seperti karbohidrat, protein dan garam. Air tipe ini merupakan air yang terikat kuat secara kimia dan tidak dapat membeku meskipun pada suhu yang sangat rendah (Winarno, 1984).

Air bebas adalah air yang menunjukkan sifat-sifat fisis dan kimia air yang cair atau membeku sesuai dengan kondisi dari larutannya. Pengurangan jumlah air bebas dalam bahan pangan ini diharapkan dapat memperbaiki kualitas bahan pangan yang dibekukan. Makin sempurna perubahan air bebas ke keadaan yang lebih stabil, makin baik retensi kualitas bahan pangan beku (Desrosier, 1988).

Pembentukan kristal es pada tahap perubahan fase dalam produk yang sedang diproses untuk disimpan beku sangat menarik perhatian, karena pengaruhnya yang ditimbulkan terhadap kualitas produk beku. Pengaruh ini diakibatkan oleh ukuran kristal es dan konfigurasi dalam jaringan pangan beku (Heldman dan Singh, 1981). Proses kristalisasi tersebut terjadi dalam dua tahap,



yang pertama adalah pembentukan inti kristal pada tahap awal pembekuan dan kedua adalah proses kristalisasi yang berlangsung setelah inti terbentuk dan mencapai ukuran yang kritis. Pembentukan inti es dapat berpengaruh terhadap laju pembekuan produk secara menyeluruh dan terhadap bentuk-bentuk kristal es di dalam pangan beku. Terjadinya formasi inti es memungkinkan pertumbuhan kristal es dalam jumlah besar tetapi dengan ukuran yang relatif kecil. Sebaliknya jumlah inti yang sedikit menghasilkan kristal es berukuran besar. Dapat disimpulkan bahwa ukuran rata-rata kristal berbanding terbalik dengan banyaknya formasi inti es, sedangkan jumlah inti itu sendiri dapat dikendalikan dengan mengatur laju pembekuan (Heldman dan Singh, 1981).

Di kalangan industri pangan beku, anggapan utama untuk menggunakan suatu proses adalah laju proses pembekuan. Laju pembekuan tidak saja menentukan struktur akhir produk, tetapi juga mempengaruhi lama waktu pembekuan. Hal ini akhirnya menentukan rancang bangun prosesnya (Heldman dan Singh, 1981). Jika kristal-kristal es dibiarkan terbentuk dengan lambat, maka kristal-kristal es yang dihasilkan akan relatif besar. Sedangkan jika dibekukan dengan cepat, maka kristal es yang terbentuk akan mempunyai tekstur yang halus (Desrosier, 1987). Bentuk kristal es ini sangat mempengaruhi mutu produk beku, dimana pada pembekuan lambat setelah

mengalami pencairan (thawing) struktur sel rusak, sehingga produk menjadi lembek (Fennema dan Powrie, 1964).

Empat faktor penting yang mempengaruhi laju pembekuan bahan pangan, yaitu : 1) beda suhu antara produk dan medium pendingin, 2) cara pindah panas ke, dari dan di dalam produk, 3) ukuran, bentuk dan tipe kemasan dan 4) ukuran, bentuk dan sifat-sifat termofisik bahan (Fennema dan Powrie, 1964).

Ramasmawy dan Tung (1984) menyatakan bahwa laju pembekuan rata-rata dapat dirumuskan sebagai :

$$w = d / 2t \dots\dots\dots (1)$$

dimana w = laju pembekuan rata-rata (cm/jam)

d = diameter silinder atau bulatan atau ketebalan lempengan tipis (cm)

t = lama pembekuan (jam)

Proses pembekuan cepat mempunyai $w > 5$ cm/jam, pembekuan sedang mempunyai w antara 1 - 5 cm/jam dan pembekuan lambat bila $w < 1$ cm/jam.

Brennan (1981) menyatakan batasan mengenai lama pembekuan, yaitu waktu selama es terbentuk di dalam bahan pangan yang dibekukan. Sedang lembaga Refrigerasi Internasional dalam Brennan (1981) memberikan batasan lama pembekuan nominal, yaitu waktu yang dibutuhkan dari saat permukaan mencapai 0°C sampai saat dimana suhu pusat mencapai sepuluh derajat lebih rendah dari suhu



mula-mula terbentuknya es pada titik tersebut. Pembatasan lama pembekuan ini merupakan masalah utama dalam pembekuan bahan pangan (Ramasmawy dan Tung, 1984).

Lama pembekuan efektif dinyatakan sebagai waktu untuk menurunkan suhu produk dari saatnya tercapai titik beku sampai besarnya suhu pusat yang diinginkan (Brennan, 1981). Pusat termal atau titik yang mendapatkan pendinginan paling lama biasanya digunakan untuk referensi lama pembekuan. Untuk pindah panas tipe konduksi, pusat termal ditentukan pada pusat geometri bahan (Ramasmawy dan Tung, 1984)

Selama proses pembekuan terjadi perubahan fraksi air menjadi es. Perubahan fraksi air tersebut mengakibatkan perubahan sifat-sifat termal bahan pangan. Menurut Succar dan Hayakawa (1984) pendugaan lama pembekuan dengan adanya perubahan sifat-sifat termal tersebut dapat dipecahkan dengan model numerik dengan pertimbangan bahwa besarnya penurunan suhu tergantung dari besarnya sifat-sifat termal tersebut bersama-sama dengan batas-batas konveksi dan radiasi yang terjadi.

Perubahan sifat-sifat termal (termofisik) yang terjadi meliputi perubahan konduktifitas termal, densitas dan panas jenis bahan. Dalam Heldman dan Singh (1981) disebutkan bahwa konduktifitas termal es lebih tinggi jika dibandingkan dengan konduktifitas termal air, sehingga pada proses pembekuan terjadi kenaikan



konduktifitas termal. Sedangkan penurunan suhu pada tahap perubahan fase menyebabkan densitas bahan lebih kecil dari densitas sebelumnya. Perubahan panas jenis berlangsung pada saat suhu mencapai titik beku, yaitu panas jenis mengalami kenaikan pesat kemudian berangsur-angsur turun sampai nilai yang lebih rendah dari panas jenis bahan tidak beku. Kenaikan panas jenis yang pesat tersebut disebabkan karena terjadi pelepasan kandungan panas laten untuk mengubah air menjadi es selama tahap perubahan fase.

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

III. PENDEKATAN TEORITIS

A. PENDUGAAN LAJU PEMBEKUAN DENGAN MODEL NUMERIK

Metoda numerik yang digunakan untuk menggambarkan proses pembekuan secara keseluruhan dilakukan dengan memasukkan perubahan sifat-sifat termofisik bahan yang terjadi secara kontinu (Cleland dan Earle, 1977).

Metoda numerik yang akan dipakai dalam penelitian ini adalah dari skema "Crank-Nicholson" yang tercantum dalam Mascheroni dan Calvelo (1982). Metoda ini menggunakan prinsip-prinsip kesetimbangan panas untuk bagian tipis dari suatu lempengan datar. Persamaan umumnya adalah sebagai berikut :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{a}{\Delta x} k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \dots \dots \dots (2)$$

Karena massa jenis (ρ) dan panas jenis (c_p) bahan selama pembekuan mengalami perubahan yang kontinu, maka persamaan (2) di atas dapat ditulis menjadi :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{a}{\Delta x} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial x} \right) \dots \dots \dots (3)$$

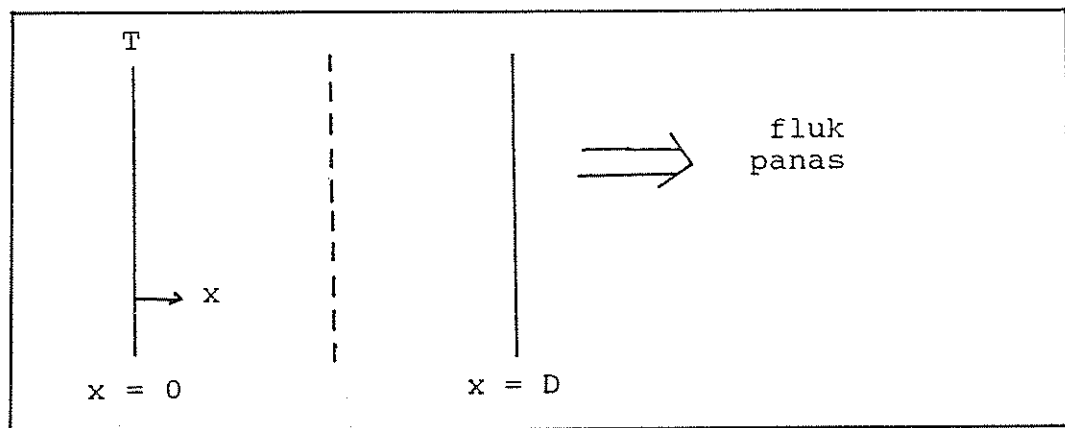
Untuk persamaan di atas terdapat kondisi awal dan kondisi batas, yaitu :

$$t = 0 \quad T = T_i \quad 0 < x < D \quad \dots \dots (4)$$

$$t > 0 \quad -k \frac{\partial T}{\partial x} = h (T - T_a) \quad x = D \quad \dots (5)$$

$$t > 0 \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad x = 0 \quad \dots (6)$$

dengan arah aliran termal seperti dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Arah aliran panas dalam lempengan tipis (slab)

Pemecahan secara numerik dilakukan dengan menggunakan metoda beda hingga. Model yang telah dikembangkan oleh Mascheroni dan Calvelo ini menggunakan analisa pindah panas satu dimensi dari lempengan datar (slab). Kondisi lempengan datar tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.

Dengan metoda ini bahan pangan berbentuk plat datar dibagi menjadi sejumlah n elemen lempengan tipis. Pemecahan dengan model numerik ini menganggap bahwa bahan pangan di dalam elemen ke n mempunyai massa M , volume $A \Delta x$, panas jenis C_p , suhu T_n , konduktifitas

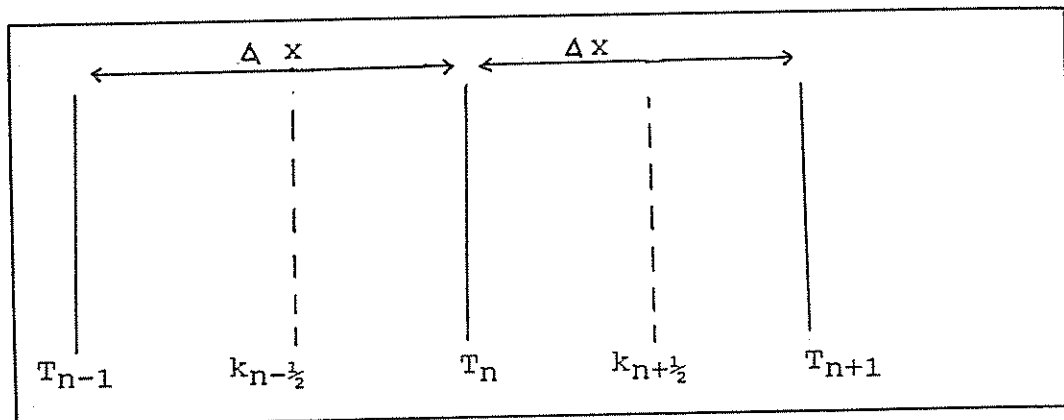


termal (k) dihitung pada posisi $n + \frac{1}{2}$ dan $n - \frac{1}{2}$. Dengan anggapan tersebut, maka persamaan (2) dapat diuraikan menjadi:

$$\left(M C_p \frac{\partial T}{\partial t} \right)_n = (kA \frac{\partial T}{\partial x})_{n+\frac{1}{2}} - (kA \frac{\partial T}{\partial x})_{n-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Apabila $M = \rho \cdot A \Delta x$, maka persamaan (7) dapat ditulis menjadi :

$$\left(\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \right)_n = \frac{1}{\Delta x} \left[(k \frac{\partial T}{\partial x})_{n+\frac{1}{2}} - (k \frac{\partial T}{\partial x})_{n-\frac{1}{2}} \right] \quad (8)$$



Gambar 2. Ilustrasi elemen kecil di dalam lempengan tipis (slab) dengan ketebalan Δx

Pemecahan nilai konduktifitas termal (k), densitas (ρ) dan panas jenis (C_p) dihitung berdasarkan perubahan fraksi kadar air beku (ω) dan suhu (T). Model ini diperoleh Riedel (1957) dan dikembangkan oleh Mascheroni dan Calvelo (1978). Persamaannya adalah sebagai berikut :

$$\omega = E - FT / (T_0 - T) \dots \dots \dots (9)$$

dimana E dan F adalah konstanta yang besarnya tergantung pada kadar air bahan. Untuk daging dengan kadar air 74 persen, nilai E = 0.9309 dan F = 3.466 x 10⁻³. Sedang untuk kadar air 73.36 persen nilai E = 0.92864 dan F = 3.591 x 10⁻³. T adalah suhu mutlak bahan dan T₀ adalah suhu kristalisasi air murni (273.16 °K).

Daging beku dianggap terdiri dari es, air dan partikel padat. Dengan anggapan tersebut, maka nilai densitas daging yang sedang dibekukan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\rho(\omega) = \rho_o / (1 + \omega\gamma(r-1)) = \rho_c \dots \dots \dots (10)$$

dimana: $r = \rho_a / \rho_h$ dan $\gamma = Y_o \rho_o / \rho_a$
 Untuk menghitung panas jenis dapat dipakai persamaan berikut :

$$C_p(\omega) = C_{po} - \omega Y_o \Delta C_p - Y_o (\lambda_f + \Delta C_p (T - T_0)) d\omega / dT \quad (11)$$

dimana: $C_p = C_{pa} - C_{ph}$

Persamaan untuk konduktifitas termal bahan ada dua macam, yaitu untuk yang sejajar dan tegak lurus terhadap arah serat. Untuk yang sejajar arah serat adalah sebagai berikut :

$$k_L = k_h \lambda + (1 - \lambda) \left[k_h \lambda^2 + k_t (1 - \lambda)^2 + \frac{4\lambda(1-\lambda)}{1/k_t + 1/k_h} \right] \quad (12)$$



$$\text{dimana : } \lambda = 1 - \sqrt{1 - \omega \gamma_0 \rho_c / \rho_h} \dots \dots \dots (13)$$

$$k_t = k_m \frac{1 - (1 - \alpha_k k_a / k_m) \beta}{1 + (\alpha_k - 1) \beta} \dots \dots \dots (14)$$

$$\alpha_k = 3 k_m / (2 k_m + k_a) \dots \dots \dots (15)$$

$$\beta = (1 - \omega) \gamma / (1 - \omega \gamma) \dots \dots \dots (16)$$

Apabila arah pindah panas tegak lurus terhadap serat bahan, maka konduktifitas termal bahan dapat dirumuskan sebagai :

$$k_p = \frac{k_h k_t (1 - \lambda)}{\lambda k_t + k_h (1 - \lambda)} + k_h \lambda \dots \dots \dots (17)$$

Sehingga nilai difusifitas panas adalah :

$$\alpha = \frac{k_L}{\rho(\omega) c_p(\omega)} \dots \dots \dots (18)$$

Nilai k_a dan k_h masing-masing adalah konduktifitas termal air dan konduktifitas es, yang besarnya dapat dihitung dengan persamaan :

$$k_h = e_1 + e_2 T \dots \dots \dots (19)$$

$$k_a = f_1 + f_2 T \dots \dots \dots (20)$$

dimana e_1 dan e_2 adalah konstanta yang besarnya masing-masing adalah 4.749 W/ mK dan -0.929×10^{-3} W/ mK. Sedangkan f_1 dan f_2 juga merupakan konstanta yang besarnya masing-masing adalah -0.6751×10^{-2} W/mK dan 2.051×10^{-3} W/mK.



Perubahan nilai sifat-sifat termal dari persamaan-persamaan di atas dimasukkan ke dalam penjabaran model numerik beda hingga yang telah dimodifikasi oleh Crank-Nicholson.

PENURUNAN MODEL NUMERIK

Penurunan model numerik dengan metoda beda hingga di Institut Pertanian Bogor sebelumnya pernah dilakukan oleh Pudjionohadi (1987) untuk menduga laju pembekuan udang dengan menggunakan "plat freezer" dan Susanto (1987) untuk menduga laju pembekuan daging sapi dengan memakai "air blast freezer". Keduanya menggunakan penyelesaian dengan skema "Crank-Nicholson" yang tercantum dalam Cleland dan Earle (1984). Penjabaran skema tersebut adalah sebagai berikut :

$$(\rho C_p)_n \frac{T_n^{i+1} - T_n^i}{\Delta t} = \frac{1}{2(\Delta x)^2} \left\{ k_{n+\frac{1}{2}} \left[(T_{n+1}^{i+1} - T_n^{i+1}) + (T_{n+1}^i - T_n^i) \right] - k_{n-\frac{1}{2}} \left[(T_n^{i+1} - T_{n-1}^{i+1}) + (T_n^i - T_{n-1}^i) \right] \right\} \quad (21)$$

Dalam penelitian ini penurunan model numerik dilakukan sesuai dengan penurunan yang telah dilakukan oleh Susanto (1987). Selain itu asumsi yang dipergunakan juga sama karena komoditi yang dipakai mempunyai struktur serat dan sifat-sifat yang sama serta memakai alat pembeku yang sama, yaitu "air blast freezer".



Asumsi-asumsi yang dipakai tersebut adalah sebagai berikut :

1. Suhu bahan pada awal pembekuan dianggap seragam.
2. Bahan dianggap homogen dan berstruktur serat sejajar.
3. Pindah panas dari medium pendingin (udara) ke bahan terjadi secara konveksi, sedang pindah panas di dalam bahan terjadi secara konduksi.
4. Pindah panas hanya terjadi pada arah tegak lurus permukaan bahan (satu dimensi).
5. Laju pindah panas di dalam produk terjadi secara seragam.
6. Koefisien pindah panas permukaan adalah seragam sepanjang permukaan bahan dan konstan selama proses pembekuan.
7. Sebelum mencapai titik beku, sifat-sifat termal bahan tetap.
8. Suhu udara dan kecepatan medium pendingin konstan dan seragam sepanjang permukaan bahan.
9. Tidak terjadi penguapan pada permukaan bahan.

Model numerik dengan skema Crank-Nicholson pada persamaan (21) ini diselesaikan dengan membagi bahan yang berbentuk plat datar (slab) menjadi sejumlah n lempengan tipis yang masing-masing mempunyai tebal Δx , sehingga didapatkan $n+1$ buah titik yang akan dihitung perubahan suhunya yang terjadi selama proses pembekuan.



Lempengan-lempengan tipis dengan tebal Δx tersebut dibuat sejajar terhadap sesamanya dan tegak lurus terhadap arah aliran termal. Titik-titik yang berjumlah $n+1$ buah tersebut diberi nama $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ dan T_{n+1} , dimulai dari pusat termal sampai permukaan lempengan yang paling luar.

Pada saat bahan mulai dibekukan ($t=0$), suhu pada setiap titik adalah seragam, sehingga $T_1 = T_2 = T_3 = \dots = T_n = T_{n+1} = T_{\text{mula-mula}}$, sesuai dengan kondisi awal pada persamaan (4). Setelah waktu pembekuan bertambah sebesar Δt yang kecil, maka akan didapat nilai-nilai $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ dan T_{n+1} yang baru. Untuk waktu pembekuan pada Δt selanjutnya, kondisi batas diturunkan dari persamaan (5) dan (6).

Dalam penelitian ini yang menjadi pusat termal bahan adalah batas insulasi. Kondisi batas insulasi ini ditunjukkan dengan persamaan (6) yaitu pada saat lama pembekuan ($t > 0$ dan $x = 0$). Sedang untuk kondisi permukaan bahan ditunjukkan pada persamaan (5), yaitu pada saat lama pembekuan ($t > 0$ dan $x = D$). Kedua kondisi batas tersebut mempengaruhi dalam proses perhitungan suhu.

Untuk kondisi batas permukaan ($x = D$), persamaannya dapat dijabarkan sebagai berikut :



$$- k \frac{\partial T}{\partial x} = h (T - T_a) \dots \dots \dots (5)$$

$$- k_{n+\frac{1}{2}} \frac{T_{n+1}^i - T_n^i}{\Delta x} = h (T_{n+1}^{i+1} - T_a) \dots \dots \dots (22)$$

Sehingga

$$T_n^i + \frac{h (\Delta x)}{k_{n+\frac{1}{2}}} T_a$$

$$T_{n+1}^{i+1} = \frac{1}{1 + \frac{h (\Delta x)}{k_{n+\frac{1}{2}}}} \dots \dots \dots (23)$$

Sedangkan penjabaran kondisi batas insulasi (x = 0) dan t > 0 adalah sebagai berikut :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \dots \dots \dots (8)$$

$$T_1^{i+1} = \frac{T_2^i + T_1^i}{2} \dots \dots \dots (22)$$

Dari uraian skema Crank-Nicholson di atas bila diterapkan untuk n+1 buah titik dapat dijabarkan sebagai berikut :

Pada saat t = 0

$$T_1^0 = T_2^0 = T_3^0 = \dots = T_n^0 = T_{n+1}^0 = T_{mula-mula} \dots \dots (25)$$

Kemudian setelah waktu pembekuan bertambah Δ t akan diperoleh n+1 buah persamaan sebagai berikut :

$$1) T_1^{\circ} = 0.5 (T_2^{\circ} + T_1^{\circ}) \dots \dots \dots (26)$$

$$2) (\rho C_p)^2 \frac{T_2^{\circ} - T_2^{\circ}}{\Delta t} = \frac{1}{2(\Delta x)^2} \left\{ k_{2\frac{1}{2}} \left[(T_3^{\circ} - T_2^{\circ}) + (T_3^{\circ} - T_2^{\circ}) \right] - k_{1\frac{1}{2}} \left[(T_2^{\circ} - T_1^{\circ}) + (T_2^{\circ} - T_1^{\circ}) \right] \right\} (27)$$

$$3) (\rho C_p)^3 \frac{T_3^{\circ} - T_3^{\circ}}{\Delta t} = \frac{1}{2(\Delta x)^2} \left\{ k_{3\frac{1}{2}} \left[(T_4^{\circ} - T_3^{\circ}) + (T_4^{\circ} - T_3^{\circ}) \right] - k_{2\frac{1}{2}} \left[(T_3^{\circ} - T_2^{\circ}) + (T_3^{\circ} - T_2^{\circ}) \right] \right\} (28)$$

$$4) (\rho C_p)^4 \frac{T_4^{\circ} - T_4^{\circ}}{\Delta t} = \frac{1}{2(\Delta x)^2} \left\{ k_{4\frac{1}{2}} \left[(T_5^{\circ} - T_4^{\circ}) + (T_5^{\circ} - T_4^{\circ}) \right] - k_{3\frac{1}{2}} \left[(T_4^{\circ} - T_3^{\circ}) + (T_4^{\circ} - T_3^{\circ}) \right] \right\} (29)$$

•
•
•

$$n) (\rho C_p)^n \frac{T_n^{\circ} - T_n^{\circ}}{\Delta t} = \frac{1}{2(\Delta x)^2} \left\{ k_{n+\frac{1}{2}} \left[(T_{n+1}^{\circ} - T_n^{\circ}) + (T_{n+1}^{\circ} - T_n^{\circ}) \right] - k_{n-\frac{1}{2}} \left[(T_n^{\circ} - T_{n-1}^{\circ}) + (T_n^{\circ} - T_{n-1}^{\circ}) \right] \right\} (30)$$

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

$$T_{n+1} = \frac{T_n + \frac{h(\Delta x)}{k_{n+\frac{1}{2}}} T_a}{1 + \frac{h(\Delta x)}{k_{n+\frac{1}{2}}}} \dots \dots \dots (31)$$

Untuk memperoleh nilai suhu, maka dapat diselesaikan dengan metoda eliminasi Gauss Siedel karena persamaan-persamaan tersebut merupakan persamaan-persamaan simultan.

Dalam penyelesaian menggunakan metoda eliminasi Gauss Siedel terlebih dahulu harus dibuat penyederhanaan dari persamaan-persamaan di atas agar lebih mudah dalam menghitung suhu pada tiap titik numerik.

Apabila
$$A = \frac{\Delta t}{2(\Delta x)^2} \frac{k_{n+\frac{1}{2}}}{(\rho C_p)_n} \dots \dots \dots (32)$$

dan
$$B = \frac{\Delta t}{2(\Delta x)^2} \frac{k_{n-\frac{1}{2}}}{(\rho C_p)_n} \dots \dots \dots (33)$$

maka persamaan (27), (28), (29) dan (30) dapat dibuat rumus umum sebagai berikut :

$$T_n = A(T_{n+1} - T_n) + (T_{n+1} - T_n) - B(T_n - T_{n-1}) + (T_n - T_{n-1}) + T_n \quad (34)$$

kemudian jika dikelompokkan menurut suhu, maka persamaan

(34) dapat ditulis menjadi :

$$2) T_2 \overset{\Delta t}{(1+A+B)} - T_3 \overset{\Delta t}{*} A = A(T_3 - T_2) - B(T_2 - T_1 - T_1) + T_2 \quad (35)$$

$$3) -T_2 \overset{\Delta t}{*} B + T_3 \overset{\Delta t}{(1+A+B)} - T_4 \overset{\Delta t}{*} A = A(T_4 - T_3) - B(T_3 - T_2) + T_3 \quad (36)$$

$$4) -T_3 \overset{\Delta t}{*} B + T_4 \overset{\Delta t}{(1+A+B)} - T_5 \overset{\Delta t}{*} A = A(T_5 - T_4) - B(T_4 - T_3) + T_4 \quad (37)$$

.

.

.

$$n-1) -T_{n-1} \overset{\Delta t}{*} B + T_{n-1} \overset{\Delta t}{(1+A+B)} - T_n \overset{\Delta t}{*} A = A(T_n - T_{n-1}) - B(T_{n-1} - T_{n-2}) + T_{n-1} \quad (38)$$

$$n) -T_n \overset{\Delta t}{*} B + T_n \overset{\Delta t}{(1+A+B)} = A(T_{n+1} - T_n) - B(T_n - T_{n-1}) + T_n \quad (39)$$

Persamaan-persamaan yang telah disederhanakan di atas dapat untuk mencari nilai suhu $T_2^{\Delta t}$, $T_3^{\Delta t}$, . . . , $T_n^{\Delta t}$, akan tetapi pada ruas kanan persamaan masih mengandung variabel yang belum diketahui, sehingga nilai-nilai suhu tersebut tidak dapat langsung dihitung. Penyelesaian selanjutnya menggunakan metoda eliminasi Gauss Siedel dengan menggunakan bantuan komputer.

Pada saat waktu pembekuan bertambah lagi sebesar Δt yang kecil, maka $T_1^{\Delta t}$, $T_2^{\Delta t}$, . . . , $T_{n+1}^{\Delta t}$ masing-masing berfungsi sebagai $T_1^{\Delta t}$, $T_2^{\Delta t}$, . . . , $T_{n+1}^{\Delta t}$. Bila



suhu-suhu tersebut berada di atas titik beku, maka nilai diffusifitas panas dianggap tetap sehingga nilai k , ρ , C_p masih belum berubah, yaitu sama dengan nilai k , dan C_p bahan sebelum membeku. Pada suhu titik beku atau lebih rendah lagi, nilai k , ρ dan C_p berubah secara kontinu sesuai dengan persamaan (9) sampai (18). Nilai suhu $T_1^0, T_2^0, \dots, T_{n+1}^0$ dan perubahan sifat termal (k, ρ, C_p) dimasukkan ke dalam skema "Crank-Nicholson" untuk mendapatkan nilai $T_1^{\Delta t}, T_2^{\Delta t}, \dots, T_{n+1}^{\Delta t}$ yang baru. Pemasukan nilai tersebut dilakukan berulang-ulang sampai diperoleh suhu pusat termal ($T_I^{\Delta t}$) yang diinginkan, yaitu sekitar -18°C . Laju pembekuan akan diperlihatkan oleh besarnya perubahan suhu terhadap waktu.

Lama pembekuan diperoleh dengan penambahan interval waktu (Δt) setiap kali perhitungan. Interval waktu ini berubah-ubah sesuai dengan yang ditentukan berdasarkan rumus bilangan Fourier dari Heldman dan Singh (1981) sebagai berikut :

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \dots \dots \dots (40)$$

Untuk menghitung bilangan Fourier, maka harus ditentukan terlebih dahulu besarnya interval waktu perhitungan awal (Δt awal). Setelah bilangan Fourier diperoleh kemudian dapat digunakan untuk menghitung interval waktu perhitungan untuk iterasi berikutnya.



C. PENYUSUNAN PROGRAM KOMPUTER

Persamaan simultan untuk menghitung suhu pada sub bab terdahulu dapat dipecahkan dengan metoda eliminasi Gaus Siedel dengan menggunakan bantuan komputer. Variabel yang belum diketahui ditempatkan pada ruas kiri persamaan, sedangkan konstanta ditempatkan pada ruas kanan persamaan. Persamaan-persamaan tersebut kemudian disusun dalam bentuk matrik sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} Q_2 & -R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -P_3 & Q_3 & -R_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -P_4 & Q_4 & -R_4 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & -P_{n-1} & Q_{n-1} & -R_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -P_n & Q_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_2 \Delta t \\ T_3 \Delta t \\ T_4 \Delta t \\ \dots \\ T_{n-1} \Delta t \\ T_n \Delta t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ \dots \\ b_{n-1} \\ b_n \end{bmatrix}$$

dimana $P = B$, $Q = 1 + A + B$, $R = A$ dan b adalah konstanta yang telah diketahui pada ruas kanan dalam persamaan (35) sampai dengan (39). Matrik di atas dapat ditulis dalam bentuk matrik yang dibesarkan ("augmented matrix") sebagai berikut :

$$\left[\begin{array}{cccccc|c} Q_2 & -R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_2 \\ -P_3 & Q_3 & -R_3 & 0 & 0 & 0 & b_3 \\ 0 & -P_4 & Q_4 & -R_4 & 0 & 0 & b_4 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & -P_{n-1} & Q_{n-1} & -R_{n-1} & b_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -P_n & Q_n & b_n \end{array} \right]$$

Selanjutnya agar penjelasan mengenai metoda eliminasi dapat lebih mudah, maka matrik tersebut ditulis dalam bentuk umum seperti yang diuraikan oleh Jogiyanto (1984) sebagai berikut :

$$\left[\begin{array}{cccccc|c} a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & b_2 \\ a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 & 0 & b_3 \\ 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 & 0 & b_4 \\ & & . & . & . & . & . \\ 0 & 0 & 0 & a_{(n-1)(n-2)} & a_{(n-1)(n-1)} & a_{(n-1)n} & b_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{n(n-1)} & a_{nn} & b_n \end{array} \right]$$

Kemudian dilakukan eliminasi dengan cara penyapuan matrik untuk mendapatkan matrik segitiga kanan atas. Cara-cara penyapuan matrik tersebut adalah sebagai berikut :

- 1) Menjadikan koefisien a_{32} pada baris dua sama dengan nol, dengan cara mengalikan setiap elemen baris pada baris pertama dengan $-a_{32}/a_{22}$, kemudian dijumlahkan dengan setiap elemen baris pada baris ke dua.
- 2) Menjadikan koefisien a_{43} pada baris ketiga sama dengan nol, dengan cara mengalikan setiap elemen baris pada baris kedua dengan $-a_{43}/a_{33}$, kemudian dijumlahkan dengan setiap elemen baris pada baris ke tiga.
- 3) Penyapuan dilakukan seterusnya sampai semua koefisien di sebelah kiri bawah diagonal bernilai nol.



Penyapuan matrik dengan cara di atas menghasilkan matrik yang sering disebut matrik U (upper right). Matrik tersebut mempunyai bentuk seperti berikut :

$$\begin{array}{cccccc|c}
 a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & b_2 \\
 0 & a_{33} & a_{34} & 0 & 0 & 0 & b_3 \\
 0 & 0 & a_{44} & a_{45} & 0 & 0 & b_4 \\
 & & & & & & \dots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & a_{(n-1)(n-1)}^{(n-3)'} & a_{(n-1)n}^{(n-3)'} & b_{n-1}^{(n-3)'} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{nn}^{(n-2)'} & b_n^{(n-2)'}
 \end{array}$$

Untuk mendapatkan nilai-nilai suhu dapat diperoleh dari hasil eliminasi di atas, yaitu dengan terlebih dahulu menentukan $T_n^{\Delta t}$ dengan cara :

$$T_n^{\Delta t} = \frac{b_n^{(n-2)'}}{a_{nn}^{(n-2)'}} \dots \dots \dots (41)$$

Setelah itu nilai $T_{n-1}^{\Delta t}$ sampai $T_2^{\Delta t}$ dapat dihitung secara berurutan. Secara umum cara-cara untuk mendapatkan matrik U seperti di atas dapat dengan menggunakan persamaan berikut :

$$a_{ij} = a_{ij} - \frac{a_{ik}}{a_{kk}} * a_{kj} \dots \dots \dots (42)$$

dimana :
 $k = 2, 3, 4, \dots n-1$
 $i = k+1, k+2, \dots n$

$$j = k, k+1, \dots, n+1$$

$$n = \text{jumlah interval } \Delta x$$

Untuk memperoleh nilai suhu T dapat dihitung dengan rumus umum berikut :

$$T_i^{\Delta t} = \frac{1}{a_{ii}} (a_{1,n+1} - \sum_{r=1+i}^n a_{ir} * T_r) \dots (43)$$

dimana :

$$i = 2, 3, 4, \dots, n$$

$$r = i+1, i+2, \dots, n$$

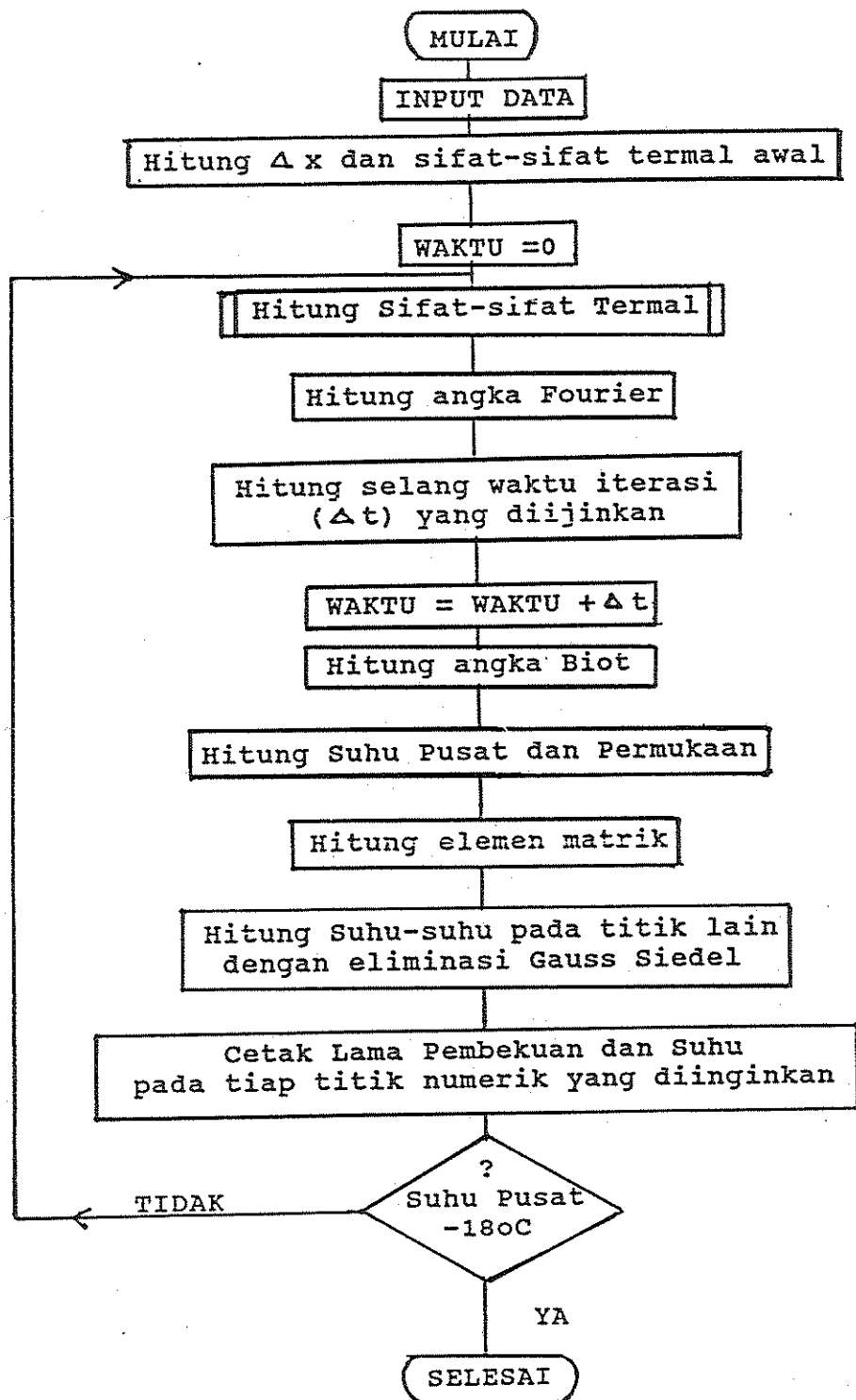
$$n = \text{jumlah interval } \Delta x$$

Perhitungan eliminasi Gaus Siedel dilakukan pada setiap pertambahan waktu Δt yang kecil sampai dicapai suhu yang diinginkan.

Diagram alir pembuatan program dapat dilihat pada Gambar 3. Program yang akan dibuat ini merupakan modifikasi program komputer yang telah dibuat oleh Pudjionohadi (1987) dan Susanto (1987).

Program untuk perhitungan numerik terdiri dari program utama dan subroutine. Program utama terdiri dari pembacaan data masukan program, perhitungan numerik dan penulisan hasil. Program subroutine berfungsi untuk menghitung perubahan sifat-sifat termal daging.





Gambar 3. Diagram alir skema Crank Nicholson untuk pembuatan program komputer menggunakan metode beda hingga

IV. METODA PENELITIAN

WAKTU DAN TEMPAT PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan pada bulan September 1990 sampai dengan bulan Desember 1990 di Laboratorium Teknik Pengolahan Pangan dan Hasil Pertanian, Jurusan Mekanisasi Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian dan di Bangsal Percontohan Pengolahan Hasil Pertanian, Darmaga Bogor.

B. ALAT DAN BAHAN

Bahan yang dipakai dalam penelitian adalah daging kambing bagian lujur ("loin trimmed") dari kambing Jawa yang berumur sekitar dua tahun, "styrofoam" dan kemasan plastik.

Alat yang dipergunakan adalah gelas ukur (400 ml), neraca analitis, alat pengukur konduktifitas termal tipe PROBE, termometer digital, alat pembeku tipe "air blast freezer", seperangkat komputer dan alat bantu lainnya.

C. PROSEDUR PENELITIAN

1. Pengukuran Data Masukan Program Komputer

Penyusunan program komputer dibuat dalam bahasa TURBO BASIC. Dalam program pendugaan laju pembekuan ini diperlukan data komputer agar program

Data-data masukan yang lain tersebut dapat dilihat pada Tabel 5 dan cara memperolehnya diuraikan pada alinea di bawahnya.

Tabel 5. Data masukan lain yang diperlukan

Parameter	Parameter
Tebal daging	Massa jenis air awal
Jumlah interval jarak	Kadar air daging awal
Interval waktu	Konduktivitas panas daging awal
Suhu medium	Konduktifitas matrik serat
Suhu daging kambing awal	Panas jenis daging awal

Tebal daging ditentukan seperti dalam percobaan pembekuan, yaitu 10 mm, 20 mm dan 30 mm, jumlah interval jarak (Δx) ditentukan sedemikian hingga pada setiap ketebalan mempunyai jarak yang sama antar titik numerik. Interval waktu ditentukan besarnya sehingga bilangan Fouriernya memenuhi syarat, yaitu bernilai $\leq \frac{1}{2}$.

Suhu medium pendingin sesuai dengan suhu yang dipakai dalam percobaan pembekuan menggunakan alat pembeku "air blast freezer", sedang suhu daging kambing awal dicatat dari hasil pengukuran termometer digital pada saat percobaan pembekuan. Massa jenis daging kambing awal diperoleh dengan melakukan pengukuran. Sejumlah berat daging kambing yang telah ditimbang



sebelumnya dimasukkan ke dalam gelas ukuran yang berisi air. Dari pengaruh penambahan sejumlah berat daging terhadap perubahan volume air yang dipindahkan, maka dapat diketahui massa jenis daging kambing tersebut.

Panas jenis daging kambing tidak beku (awal) dapat ditentukan dengan menggunakan rumus Dickerson (1969) dalam Heldman dan Singh (1981), yaitu sebagai berikut:

$$C_{po} = 1.675 + 0.025 * Y_o \dots \dots \dots (44)$$

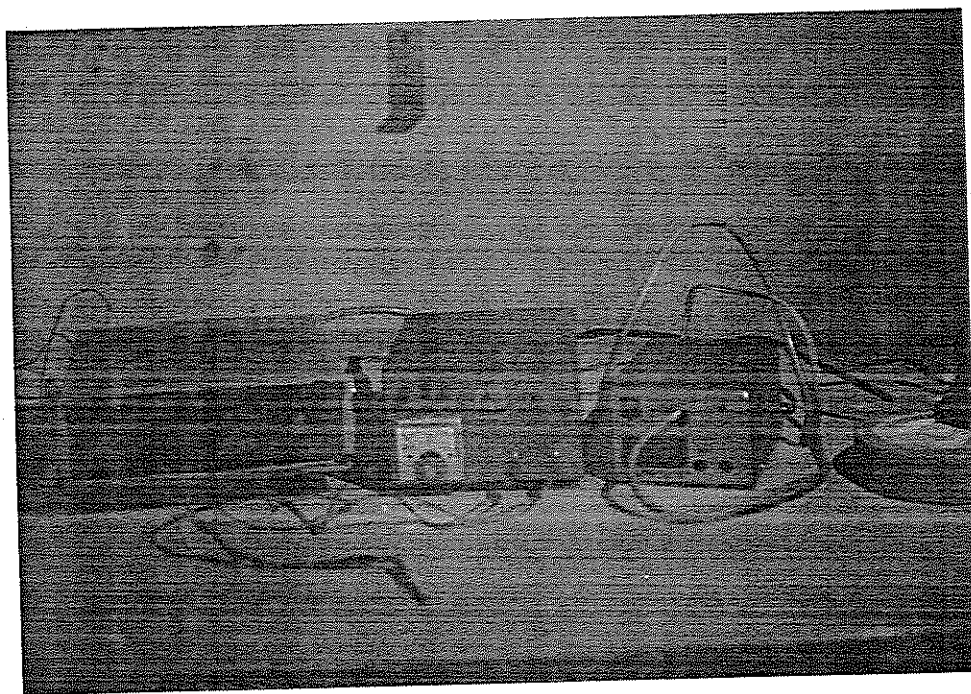
Konduktifitas panas daging awal dapat diukur dengan menggunakan alat pengukur konduktifitas termal tipe "Probe". Persamaan yang dipakai dalam perhitungan adalah sebagai berikut :

$$T_2 - T_1 = \frac{C q \ln (t_2/t_1)}{4 \pi k} \dots \dots \dots (45)$$

Dari pengukuran alat tipe "Probe" didapat data perubahan suhu terhadap waktu yang dilakukan pada gliserol dan daging kambing. Data yang didapat dari pengukuran gliserol dipakai untuk mencari konstanta C dari alat yang kemudian dimasukkan dalam persamaan (45). Nilai konduktifitas gliserol dalam hal ini telah diketahui yaitu sebesar 0.284 W/m C. Data perubahan suhu terhadap waktu diplotkan pada grafik semi-log atau kertas grafik biasa dengan sumbu vertikal



berupa ln waktu kemudian dicari dua titik yang membatasi garis lurus, yaitu suhu 1 (T_1) dan suhu 2 (T_2) dan waktu 1 (t_1) serta waktu 2 (t_2). Dengan dua titik tersebut dan dengan nilai konstanta (C) yang telah didapat, maka nilai konduktifitas termal daging kambing dapat dicari menggunakan persamaan (45). Alat pengukur konduktifitas termal tipe "Probe" dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Alat pengukur konduktifitas termal tipe "Probe"

Konduktifitas matrik serat dapat ditentukan se cara "trial and error" berdasarkan persamaan konduktifitas termal yang telah dicantumkan dalam sub bab sebelumnya.



Suhu titik beku yang akan digunakan dalam program komputer dihitung dengan menggunakan persamaan (9) dimana keadaan fraksi air beku mempunyai nilai nol.

2. Penentuan Sifat-Sifat Termofisik

Selama proses pembekuan, sifat-sifat termofisik daging kambing mengalami perubahan. Sifat-sifat termofisik diukur pada beberapa titik suhu tertentu, yaitu di atas dan di bawah suhu titik beku. Untuk mencapai suhu-suhu yang diinginkan tersebut, bahan diturunkan suhunya menggunakan "air blast freezer". Tiap pengukuran dilakukan dengan tiga kali ulangan.

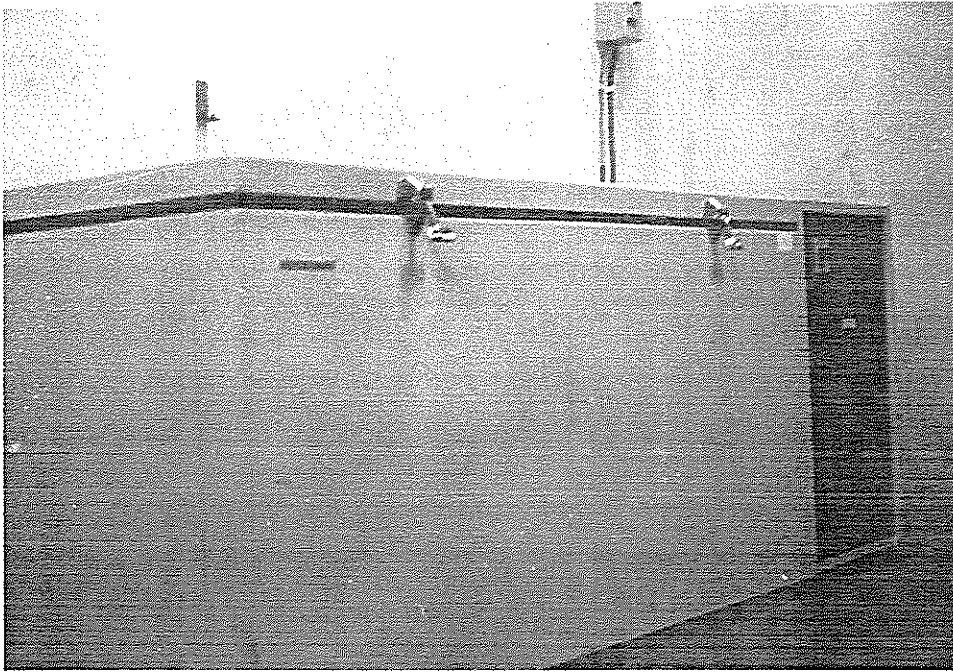
3. Percobaan Pembekuan

Dalam penelitian ini digunakan alat pembeku "air blast freezer" untuk membekukan daging kambing. Alat tersebut dapat dilihat pada Gambar 5 dan 6.

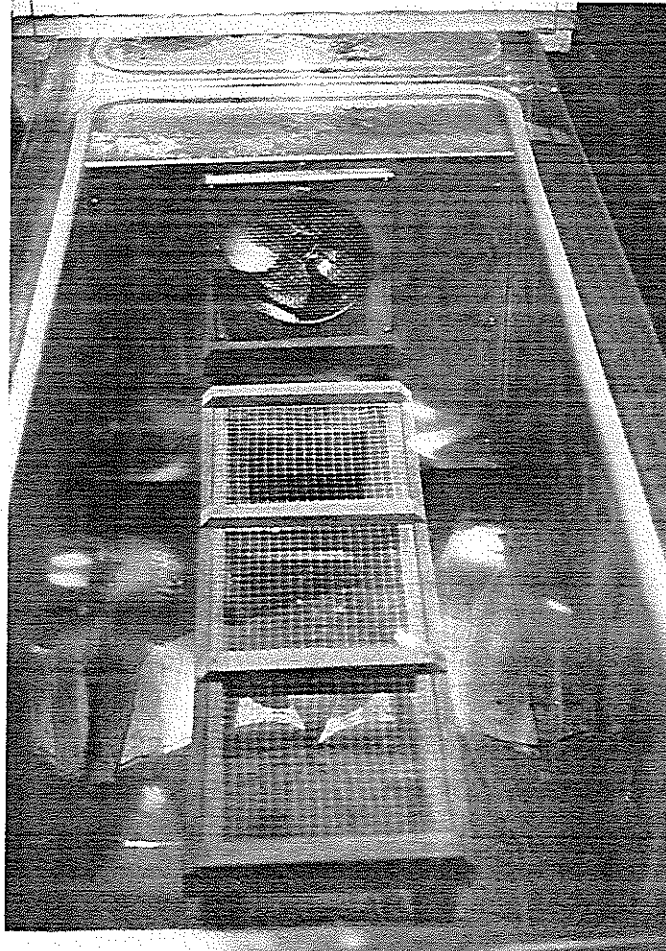
Percobaan pembekuan ini dimaksudkan untuk mendapatkan data yang akan dipakai dalam pengujian model. Percobaan dilakukan dengan menggunakan contoh daging yang dibuat dengan tiga macam ketebalan, yaitu 10 mm, 20 mm dan 30 mm. Daging tersebut berbentuk balok dengan ukuran sisi bujur sangkar 100 mm.

Pindah panas yang terjadi diusahakan hanya terjadi pada satu arah (satu dimensi). Ini dapat dilakukan dengan membiarkan satu bidang terbuka





Gambar 5. Tampak luar alat pembeku "air blast freezer"



Gambar 6. Bagian dalam alat pembeku "air blast freezer"

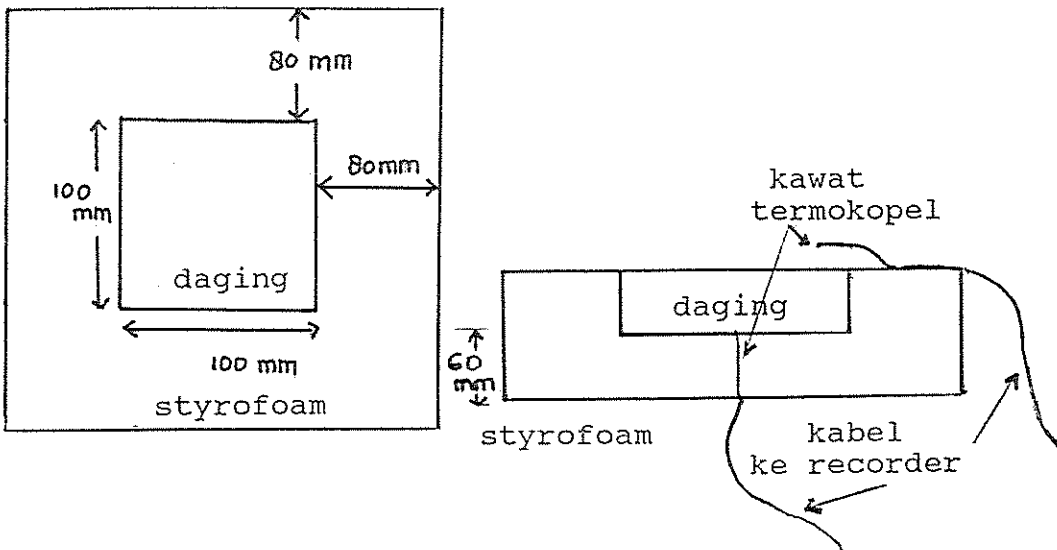


terhadap udara pendingin, sedang bidang-bidang yang lain dibatasi oleh insulasi. Percobaan pembekuan ini menggunakan "styrofoam" sebagai bahan insulasi dengan ketebalan 60 mm pada bagian yang berlawanan dengan arah pindah panas, dan 80 mm pada bagian samping seperti dapat dilihat pada Gambar 7 dan 8.

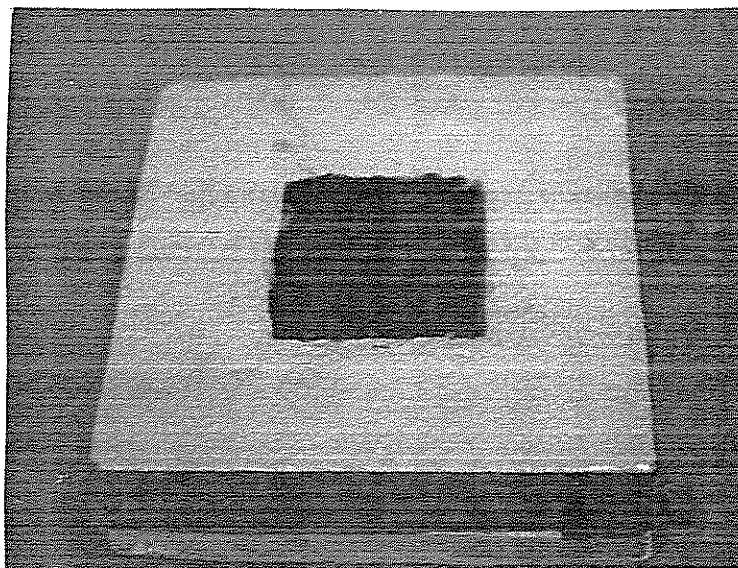
Untuk mengurangi pengeringan pada daging yang dibekukan, maka perlu dilakukan pengemasan dengan kemasan yang terbuat dari plastik film.

Perubahan suhu yang terjadi selama proses pembekuan diamati dengan menggunakan termometer digital yang sensornya dipasang pada pusat termal bahan. Pencatatan perubahan suhu dilakukan tiap lima menit dan dihentikan saat pusat termal bahan mencapai suhu -18°C . Percobaan dilakukan sebanyak tiga kali ulangan. Susunan termometer selama pengukuran suhu pusat daging saat percobaan pembekuan dapat dilihat pada Gambar 9.

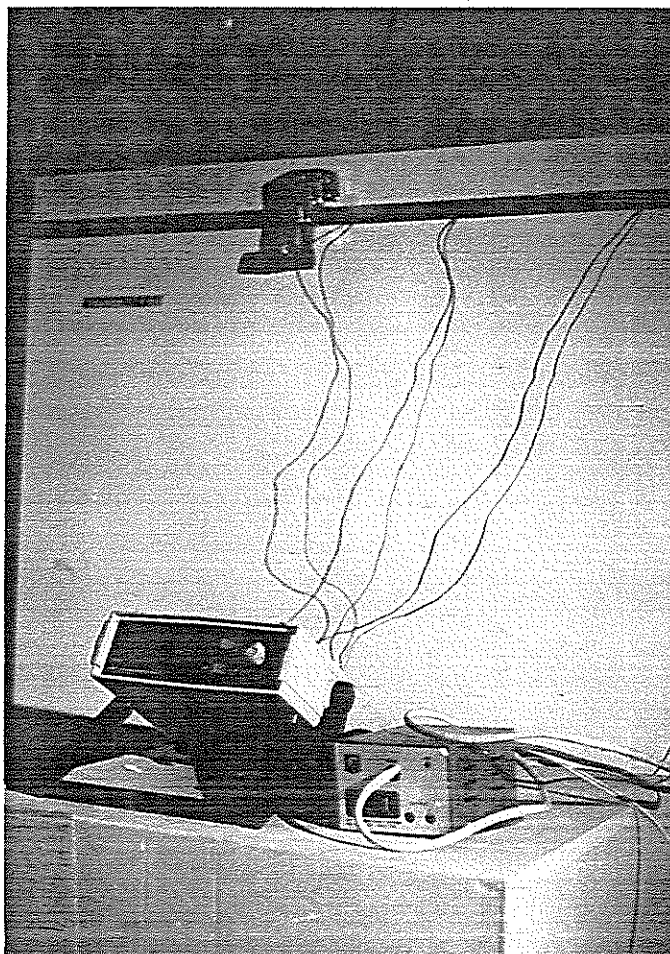




Gambar 7. Susunan daging kambing, styrofoam dan pengukur suhu



Gambar 8. Contoh potongan daging kambing yang telah diinsulasi dengan "styrofoam"



Gambar 9. Susunan termometer digital selama pengukuran suhu pusat

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

Model pendugaan laju pembekuan dengan metoda beda hingga ini disusun menggunakan input parameter yang didapat dari pengukuran langsung disamping dari berbagai sumber data hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Input parameter tersebut kemudian dimasukkan ke dalam program komputer untuk mendapatkan hasil yang diinginkan. Pada Lampiran 1. dapat dilihat daftar simbol dari program komputer yang digunakan.

Menurut pengujian Laboratorium Balai Besar Industri Hasil Pertanian (BBIHP) Bogor ternyata daging kambing mempunyai kadar air sebesar 72.5 persen. Besarnya kadar air ini menentukan nilai konstanta E dan F. Dengan kadar air tersebut di atas dan menggunakan cara interpolasi seperti telah disebutkan dalam metoda penelitian, maka nilai konstanta E didapat sebesar 0.9256 dan konstanta F sebesar 3.75897×10^{-3} . Lampiran 3 menunjukkan data pengukuran nilai kadar air daging kambing.

Massa jenis daging kambing awal yang didapat dari hasil pengukuran adalah 1169 kg/m^3 . Hasil pengukuran massa jenis ini dapat dilihat pada Lampiran 2, yaitu pengukuran massa jenis daging kambing pada suhu-suhu tertentu sebelum membeku dan setelah membeku.

Konduktifitas termal daging kambing awal diperoleh dari hasil pengukuran menggunakan alat pengukur konduktifitas termal tipe "Probe". Konduktifitas termal awal daging ini

merupakan hasil pengukuran konduktifitas termal pada satu titik suhu sebelum membeku, yaitu pada suhu 7.5°C . Pada Lampiran 11 dapat dilihat hasil pengukuran konduktifitas termal daging kambing baik sebelum membeku maupun setelah membeku.

Konduktifitas termal daging kambing dengan menggunakan metoda "Probe" ini dihitung berdasarkan persamaan (45). Untuk menentukan suhu 1 (T_1), suhu 2 (T_2), waktu 1 (t_1) dan waktu 2 (t_2), maka data waktu dan suhu diplot pada kertas grafik semi-log atau kertas grafik biasa dengan suhu vertikal berupa \ln waktu. Setelah itu, dari plot grafik tersebut dicari titik yang membatasi garis lurus seperti terlihat pada Lampiran 5 dan 9 yang menunjukkan plot grafik dari pengukuran gliserol dan daging kambing. Percobaan dengan menggunakan gliserol tersebut dipakai untuk menentukan nilai konstanta (C) dari alat pengukur konduktifitas termal tipe "Probe". Setelah nilai konstanta (C) tersebut didapat, baru dapat mencari nilai konduktifitas termal (k) daging kambing. Data pengamatan kenaikan suhu metode "Probe" untuk gliserol dan daging kambing dapat dilihat pada Lampiran 4 dan 8, sedangkan contoh perhitungan konstanta (C) pada Lampiran 6 dan penentuan nilai konduktifitas termal daging kambing pada Lampiran 10. Dari hasil perhitungan konduktifitas termal pada suhu 7.5°C didapat nilai sebesar 0.334 W/mK . Pada Lampiran 11, dapat dilihat hasil perhitungan konduktifitas termal daging kambing pada suhu-suhu tertentu selama pembekuan.



Konduktifitas matriks serat daging kambing didapat dengan cara "trial and error" menggunakan persamaan (12) sampai dengan persamaan (16) dengan sifat-sifat termal daging kambing yang telah didapat.

Panas jenis daging kambing awal dihitung menggunakan rumus Dickerson (1969) seperti pada persamaan (44) yang menggunakan data kadar air, yaitu:

$$C_{po} = 1.675 + 0.025 * Y_o \dots \dots \dots (44)$$

Rumus Dickerson ini dipilih untuk menduga nilai panas jenis awal karena telah digunakan secara meluas pada makanan berkadar air tinggi seperti halnya daging. Dengan menggunakan rumus tersebut, panas jenis daging kambing awal didapat sebesar 3.4875 kJ/kg K.

Massa jenis air, massa jenis es dan panas kristalisasi es diperoleh dari Mascheroni dan Calvelo (1982). Sedangkan panas kristalisasi air murni diperoleh dari Heldman dan Singh dan Mascheroni dan Calvelo (1982). Panas kristalisasi air murni tersebut sebesar 334.4 kJ/kg, sedang beda panas jenis es terhadap panas jenis air murni sebesar 2.135 kJ/kg K.

Sebelum bahan mencapai suhu titik beku, sifat-sifat panas bahan dianggap belum berubah. Yang dimaksud dengan suhu titik beku adalah suhu bahan dimana terjadi pengkristalan air yang pertama. Perhitungan dengan menggunakan persamaan (9) dimana keadaan fraksi es (ω) sama dengan nol menghasilkan suhu titik beku daging kambing sebesar -1.1°C .

Setelah suhu titik beku tercapai, maka akan terjadi perubahan yang besar terhadap sifat-sifat termal. Dalam program pendugaan untuk perhitungan sifat termal dipakai asumsi bahwa daging kambing terdiri dari struktur serat dengan arah yang sejajar dengan arah pindah panas. Oleh karena itu perubahan konduktifitas termal daging kambing selama pembekuan dihitung memakai persamaan (12).

Suhu medium yang ditunjukkan oleh "air blast freezer" adalah sebesar $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, tetapi pengukuran suhu udara di atas permukaan daging menunjukkan suhu yang lebih tinggi, yaitu sekitar $-27.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Karena merupakan kondisi sebenarnya dari pengujian, maka suhu $-27.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ dipakai sebagai masukan program komputer.

Input parameter untuk model pendugaan laju pembekuan yang telah didapat tersebut disajikan pada Lampiran 13 dan siap dimasukkan ke dalam program komputer pendugaan laju pembekuan yang dapat dilihat pada Lampiran 14. Keterangan program tersebut dapat dilihat pada Lampiran 15.

Dalam penyelesaian skema Crank-Nicholson, daging sapi dengan ketebalan satu cm, dua cm dan tiga cm dibagi dengan jumlah interval jarak (Δx) yang berbeda-beda. Daging dengan ketebalan satu cm dibagi menjadi lima interval jarak sehingga terdapat enam buah titik numerik. Daging dengan ketebalan dua cm dibagi menjadi sepuluh interval jarak sehingga terdapat sebelas buah titik numerik dan daging dengan ketebalan tiga cm dibagi menjadi 15 interval jarak sehingga terdapat 16



buah titik numerik. Titik-titik numerik tersebut mempunyai jarak yang sama antara satu dengan yang lain pada setiap ketebalan daging, yaitu 0.002 m. Perhitungan suhu pada tiap titik numerik dilakukan pada setiap interval waktu tertentu yang besarnya ditentukan berdasarkan bilangan Fourier yang rumusnya seperti berikut :

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \dots \dots \dots (45)$$

Menurut Heldman dan Singh (1981), pemecahan dengan metoda numerik pada bahan dengan pindah panas satu dimensi harus dipenuhi syarat tertentu, yaitu nilai $Fo \leq \frac{1}{2}$. Untuk memenuhi persyaratan tersebut, maka harus ditentukan interval waktu yang sesuai. Dalam penelitian ini digunakan interval waktu awal sebesar 24 detik. Bilangan Fourier yang didapat dengan menggunakan interval waktu awal sebesar 24 detik tersebut kemudian digunakan untuk menghitung interval waktu perhitungan untuk iterasi berikutnya.

Daging kambing mempunyai sifat-sifat termal pada keadaan tidak beku sebagai berikut : konduktifitas termal (k) = 0.334 W/mK, massa jenis (ρ) = 1169 kg/m³, panas jenis (C_p) = 3.4875 kJ/kgK. Dengan menggunakan interval waktu awal sebesar 24 detik, maka besarnya bilangan Fourier adalah :

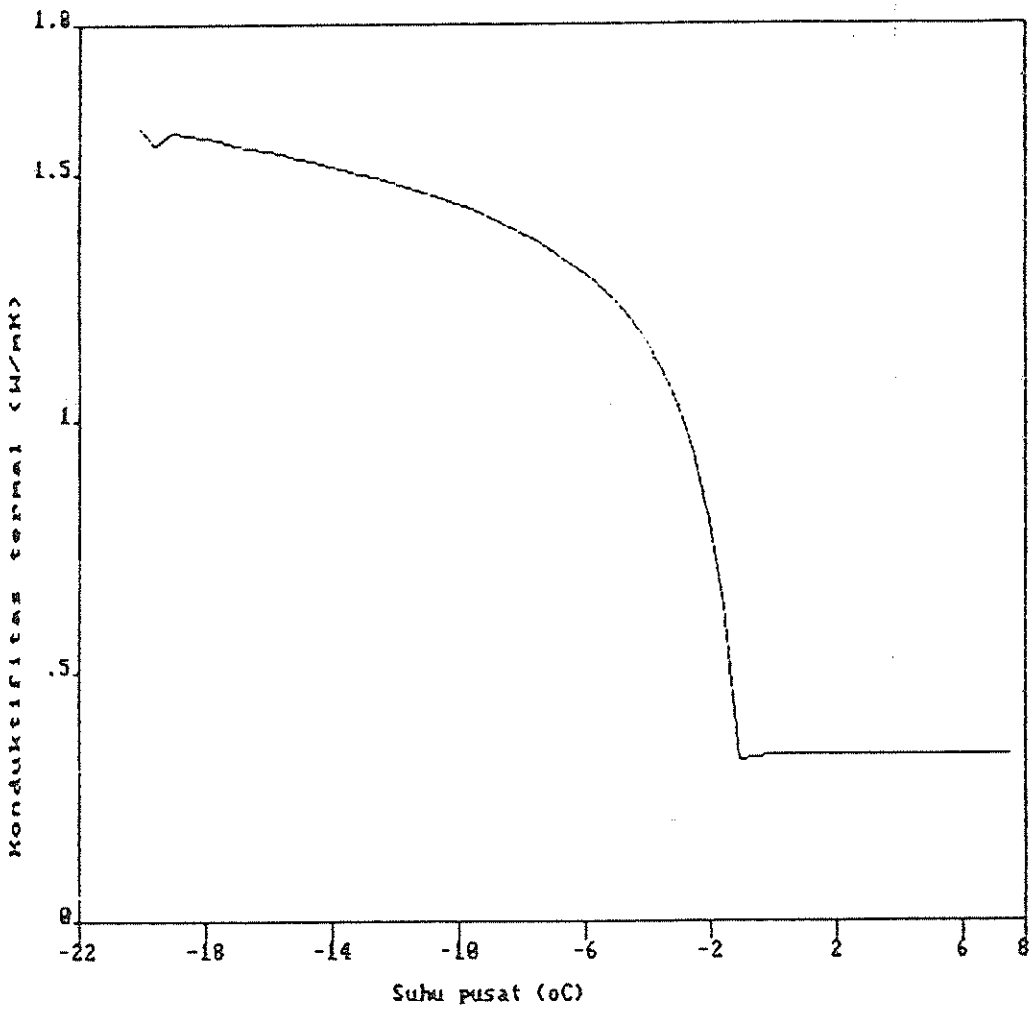
$$Fo = \frac{(0.334) (24)}{(1169) (3.4875) (1000) (0.002)^2} = 0.492$$

Jadi nilai Fo memenuhi syarat, yaitu $< = \frac{1}{2}$.

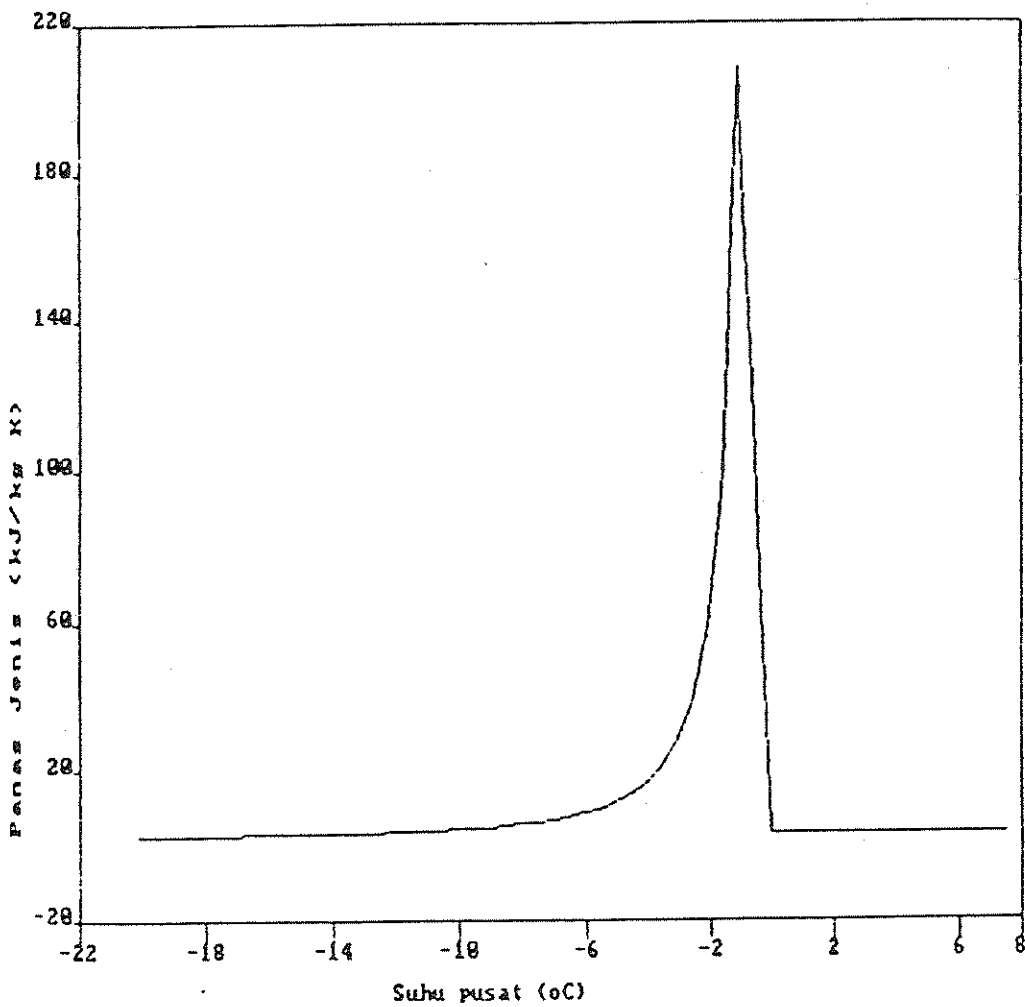
Data penurunan suhu hasil percobaan pembekuan disajikan pada Lampiran 20 sampai 22, sedang hasil pendugaan numerik pada Lampiran 16 sampai 18. Meskipun perhitungan suhu pada titik numerik dilakukan pada enam buah titik numerik pada ketebalan satu cm, sebelas buah titik numerik pada ketebalan dua cm dan 15 buah titik numerik pada ketebalan tiga cm, tetapi yang ditampilkan dalam contoh hasil pendugaan numerik hanya pada suhu pusat (T_1), suhu pada sekitar setengah ketebalan sampel daging dan suhu permukaan.

Hasil pendugaan numerik menunjukkan bahwa interval waktu perhitungan tidak sama selama proses perhitungan. Pada saat periode "precooling" interval waktu tersebut masih tetap, tetapi pada periode perubahan fase dan "tempering" mengalami perubahan yang kontinyu. Hal ini disebabkan oleh karena terjadinya perubahan difusifitas panas selama proses pembekuan terutama pada periode perubahan fase dan "tempering". Perubahan interval waktu yang besar terjadi pada saat suhu mencapai titik beku. Pada saat itu nilai difusifitas panas mencapai nilai minimum sehingga interval waktu perhitungan mencapai nilai maksimum. Akibatnya suhu titik beku berlangsung dalam selang waktu yang lama. Perubahan nilai difusifitas panas tersebut disebabkan oleh karena adanya perubahan sifat-sifat termal, yaitu konduktifitas termal, massa jenis dan panas jenis. Setelah suhu titik beku tercapai, konduktifitas termal akan mengalami kenaikan yang kontinyu, sedang massa jenis akan mengalami penurunan. Panas jenis pada





Gambar 10. Grafik perubahan nilai konduktivitas termal selama pembekuan hasil pendugaan numerik



Gambar 11. Grafik perubahan panas jenis selama pembekuan hasil perhitungan numerik

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

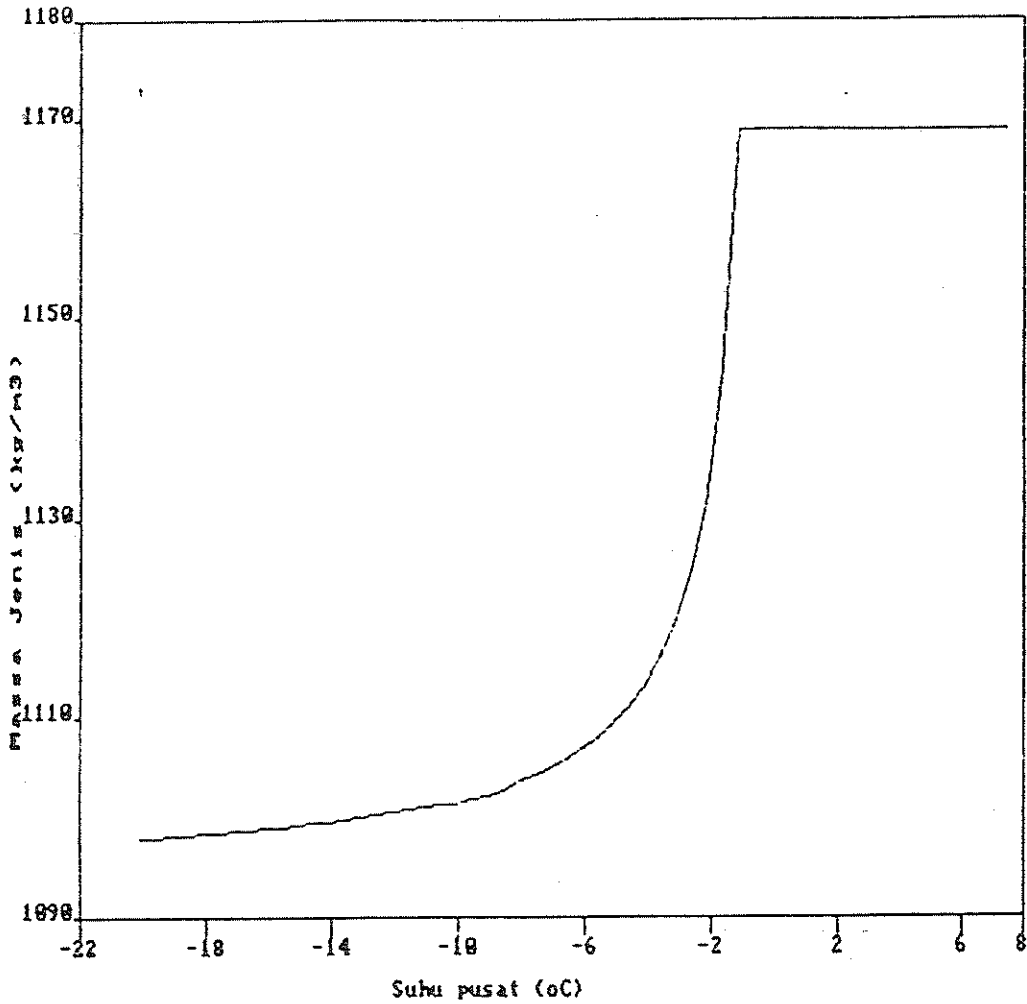
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.





Gambar 12. Grafik perubahan massa jenis selama pembekuan hasil perhitungan numerik

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

penelitian ini tidak diukur karena adanya kesulitan alat. Hasil pengukuran nilai konduktifitas termal dan massa jenis selama pembekuan tersebut bila dibandingkan dengan hasil pendugaan numerik ternyata berbeda. Hal ini dapat disebabkan oleh berbagai hal. Diantaranya karena kondisi pengukuran yang tidak memenuhi syarat. Pada pengukuran massa jenis suhu beku digunakan alat pembeku "air blast freezer", dengan menggunakan alat ini akan terjadi penguapan yang cukup besar pada bahan apabila tidak dilakukan pengemasan. Dengan adanya penguapan air tersebut maka fraksi air dalam bahan akan berkurang sehingga berat bahan tidak sesuai dengan yang seharusnya. Hal ini akan mempengaruhi hasil pengukuran massa jenis yang didapat. Disamping itu sensor termokopel yang dimasukkan ke dalam daging yang akan diukur massa jenisnya sulit diletakkan pada lokasi yang seragam untuk tiap pengukuran sehingga tidak memberikan hasil pengukuran pada titik yang seharusnya. Sedangkan pada pengukuran konduktifitas termal, hasil yang didapat tidak sesuai dengan pendugaan karena pengukuran dilakukan di luar alat pembeku yang mempunyai suhu medium yang berbeda dengan suhu daging yang diukur.

Pada awalnya, pengukuran sifat-sifat termal selama pembekuan tersebut bertujuan untuk membuat suatu model matematik pendugaan sifat-sifat termal yang nantinya dapat dimasukkan ke dalam program komputer. Dengan program komputer yang baru tersebut diharapkan dapat menduga sifat-sifat termal daging kambing yang akhirnya juga berfungsi untuk menduga

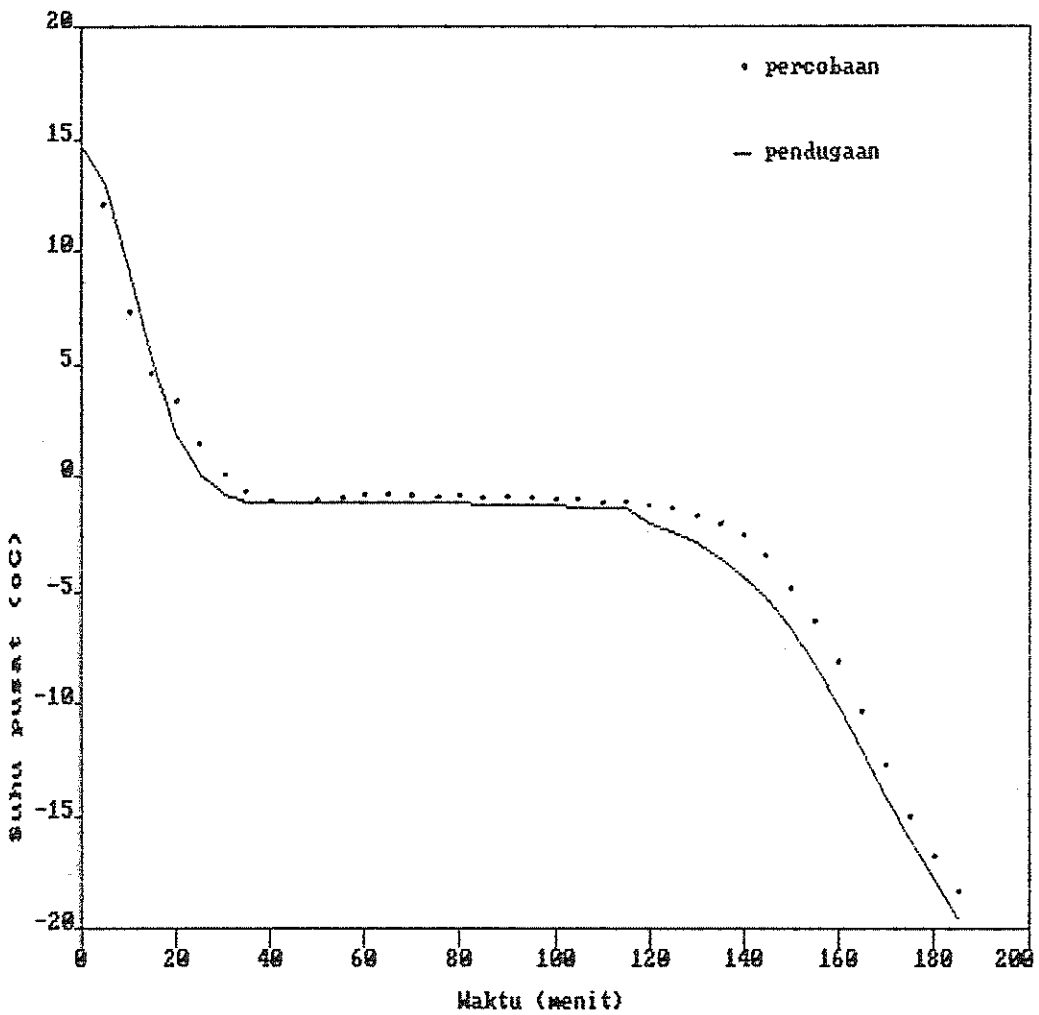
laju pembekuannya. Karena pengukuran tidak memberikan hasil yang baik, maka tidak dapat dibuat model matematik dari sifat-sifat termal tersebut. Akibatnya program numerik laju pembekuan daging kambing yang baru juga tidak dapat dibuat. Untuk penelitian selanjutnya perlu dipikirkan perbaikan dari cara pengukuran sifat-sifat termal tersebut pada suhu beku.

Perbandingan kurva penurunan suhu pusat daging kambing hasil percobaan pembekuan terhadap hasil pendugaan numerik dapat dilihat pada Gambar 13 sampai 15, masing-masing untuk ketebalan satu cm, dua cm dan tiga cm. Pada Gambar 13 untuk ketebalan satu cm, ternyata hasil pendugaan numerik pada periode "tempering" bersifat "under estimate", begitu juga untuk ketebalan tiga cm. Untuk ketebalan dua cm pada Gambar 14 dapat dilihat bahwa hasil pendugaan pada periode "tempering" bersifat "over estimate".

Bentuk kurva perbandingan antara percobaan pembekuan dengan pendugaan numerik secara umum menunjukkan arah dan laju pembekuan yang sesuai. Bentuk kurva tersebut dipengaruhi oleh variasi dari titik beku dan air tidak beku dari bahan.

Ketebalan daging satu cm pada Lampiran 20 menunjukkan bahwa lama pembekuan dari suhu 14.7°C hingga mencapai suhu pusat -18°C diperlukan waktu 185 menit, ketebalan dua cm pada Lampiran 21 dari suhu -15°C sampai -18°C memerlukan waktu 320 menit dan ketebalan tiga cm pada Lampiran 22 dari suhu 14.8°C sampai -18°C memerlukan waktu 510 menit.





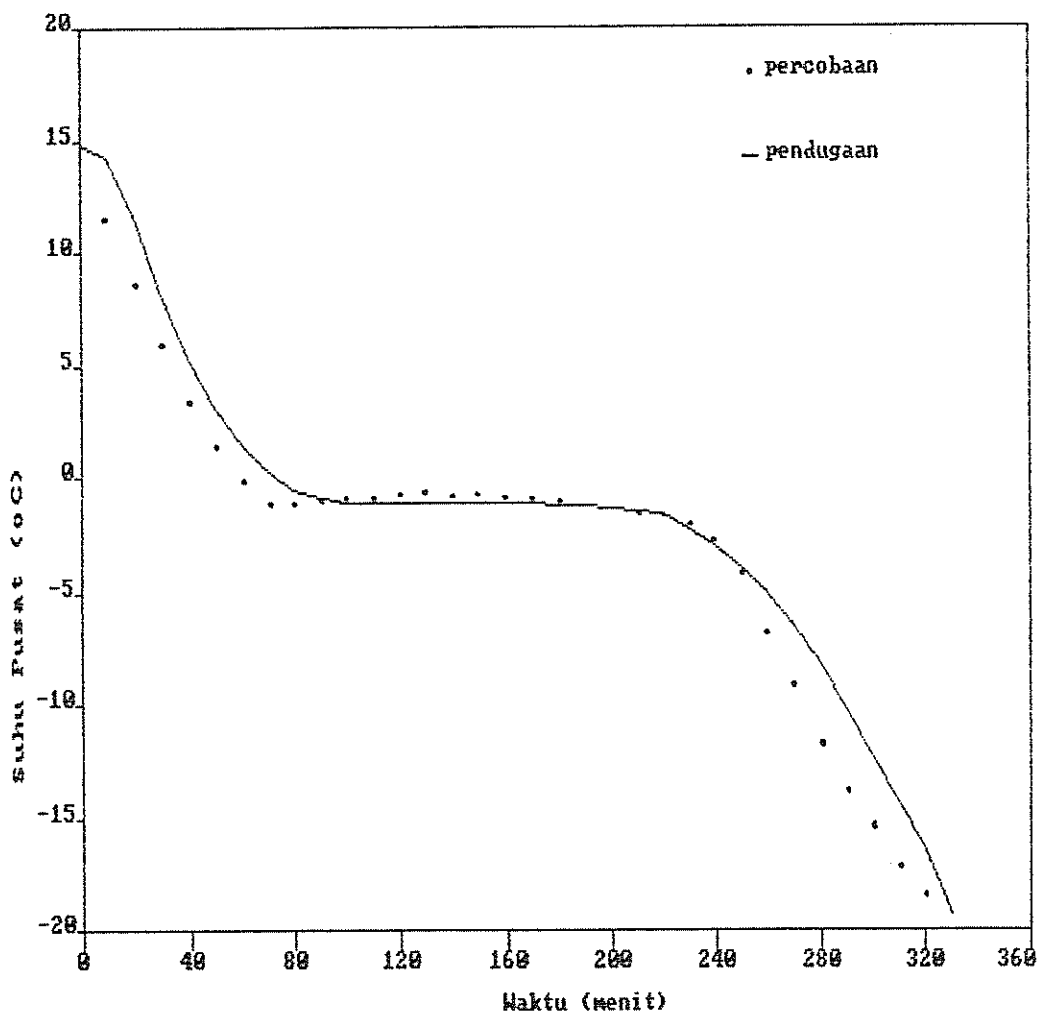
Gambar 13. Perbandingan kurva penurunan suhu pusat daging kambing hasil percobaan terhadap hasil pendugaan numerik (ketebalan 1 cm)

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

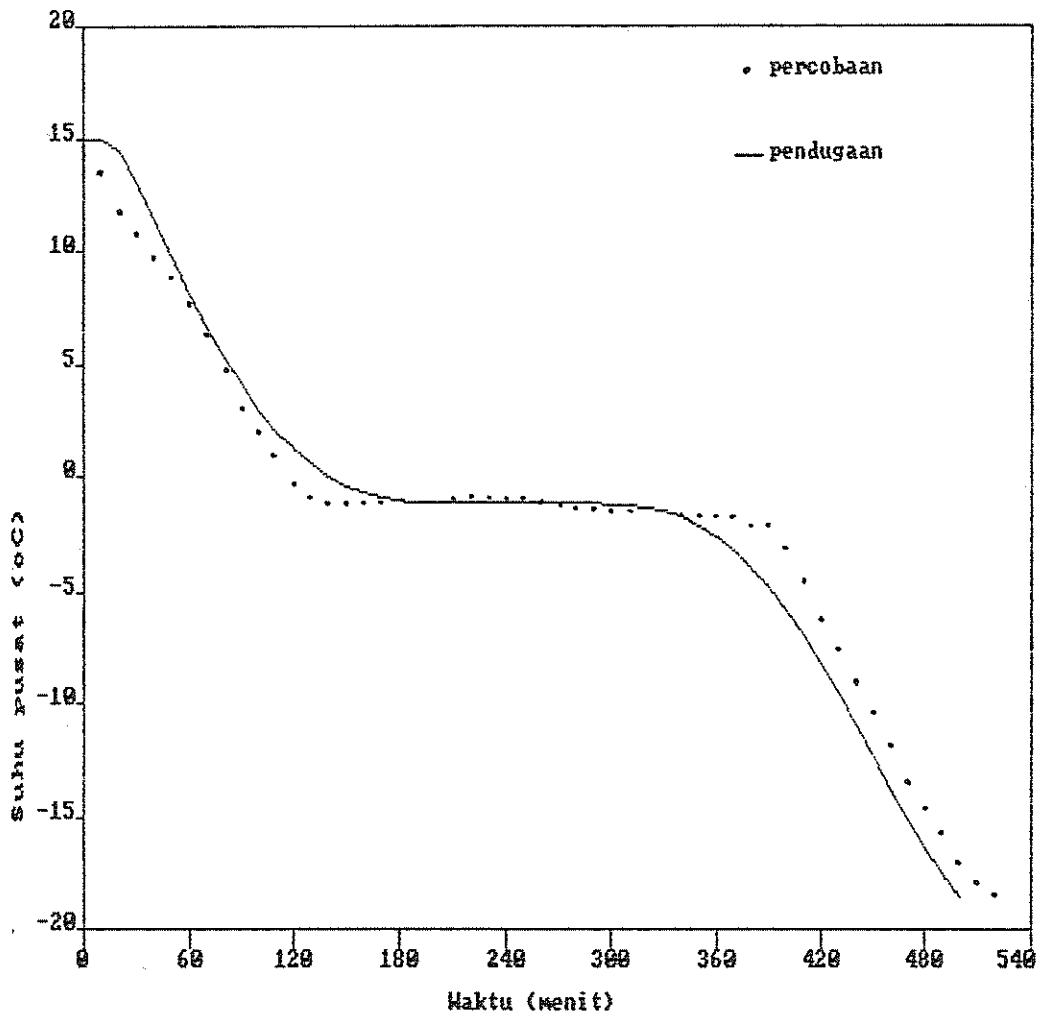


Gambar 14. Perbandingan kurva penurunan suhu pusat daging kambing hasil percobaan terhadap hasil pendugaan numerik (ketebalan 2 cm)



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Gambar 15. Perbandingan kurva penurunan suhu pusat daging kambing hasil percobaan terhadap hasil pendugaan numerik (ketebalan 3 cm)

Laju pembekuan dihitung menggunakan persamaan (1) berdasar lama pembekuan nominal. Lama pembekuan nominal adalah waktu yang dibutuhkan oleh bahan pangan untuk membeku dimulai dari suhu permukaan mencapai nol °C sampai pusat termal mencapai suhu tertentu. Dengan interpolasi Lampiran 17 sampai 19 diperoleh hasil sebagai berikut: pada ketebalan satu cm, suhu permukaan mencapai 0°C setelah pembekuan berjalan 9.5 menit dan suhu pusat mencapai -11.1°C (sepuluh derajat di bawah suhu titik beku) setelah pembekuan berjalan 162.5 menit. Pada ketebalan dua cm, suhu permukaan mencapai 0°C setelah 10 menit dan suhu pusat mencapai -11.1°C setelah 295 menit. Ketebalan tiga cm, suhu permukaan mencapai 0°C setelah 10.2 menit dan suhu pusat mencapai -11.1°C setelah 441 menit. Untuk ketebalan 1 cm, laju pembekuan yang didapat adalah sebesar 0.392 cm/jam, ketebalan dua cm sebesar 0.421 cm/jam dan ketebalan tiga cm sebesar sebesar 0.418 cm/jam. Dari ketiga hasil perhitungan laju pembekuan tersebut, ternyata pembekuan yang dilakukan termasuk katagori laju pembekuan lambat.

Untuk mencari suhu pembekuan yang optimum, program komputer dicoba diterapkan pada daging dengan ketebalan dua cm. Hasil dari pendugaannya menunjukkan bahwa untuk mendapatkan laju pembekuan sedang sampai cepat ($w > 1$ cm/jam), suhu optimum yang diperlukan adalah sebesar -80°C atau lebih rendah lagi. Dengan suhu pembekuan sebesar -80°C didapatkan laju pembekuan sebesar 1.01 cm/jam.

Dengan laju pembekuan lambat seperti yang dihasilkan oleh percobaan pembekuan dalam penelitian ini, akan dihasilkan kualitas produk beku yang kurang baik sehubungan dengan pembentukan inti kristal. Pembekuan lambat akan menghasilkan kristal-kristal es yang besar dengan jumlah inti yang sedikit. Akibat utamanya terjadi pada saat pencairan, yaitu terjadinya kerusakan pada struktur sel produk. Dengan pengaturan kondisi pembekuan, dapat dicapai laju pembekuan yang diinginkan sehingga struktur akhir produk yang baik dapat diperoleh.

Pada masukan program numerik, koefisien konveksi diambil sebesar 21 W/m K , nilai ini merupakan pendekatan dari nilai yang diberikan oleh Heldman dan Singh (1981), yaitu sebesar 22 W/m K . Nilai yang diambil merupakan pendekatan karena hasil pendekatan numerik yang didapat lebih sesuai dengan data percobaan pembekuan. Dengan melihat kenyataan ini dapat diambil kesimpulan bahwa nilai koefisien konveksi mempunyai pengaruh terhadap laju pembekuan. Koefisien konveksi yang lebih besar akan menghasilkan laju pembekuan yang lebih cepat. Nilai konveksi yang besar akan mempengaruhi besarnya suhu permukaan yang didapat, sedangkan suhu permukaan ini dipakai untuk menghitung suhu-suhu pada titik numerik di bawahnya yang kemudian secara tidak langsung akan mempengaruhi suhu pusat termal. Jika koefisien konveksi makin besar, maka suhu permukaan makin rendah sehingga suhu pusat termal juga semakin rendah, akibatnya lama pembekuan yang diperlukan akan semakin singkat.



Untuk mengevaluasi model pendugaan dipakai perhitungan persentase simpangan hasil pendugaan numerik. Pada Lampiran 23 sampai 25 dapat dilihat hasil perhitungannya, dimana rata-rata persentase simpangan untuk ketebalan satu cm sebesar 6.5 persen, ketebalan dua cm sebesar 3.3 persen dan ketebalan tiga cm sebesar 4.8 persen. Menurut Pham (1986), ketelitian yang diharapkan dari pengukuran di bidang keteknikan lebih kurang adalah sepuluh persen. Jadi hasil pendugaan numerik yang didapat masih dalam batas yang diijinkan. Selanjutnya model simulasi komputer yang telah disusun, dengan masukan-masuka program yang telah diperoleh, hasilnya dapat digunakan untuk merekayasa sistem pembekuan daging kambing. Dengan model tersebut, dapat ditentukan ketebalan produk dan suhu pembekuan yang optimum sehingga didapat laju pembekuan yang diinginkan yang akhirnya akan menentukan struktur akhir produk. Disamping itu, dengan model tersebut dapat juga diperkirakan lama pembekuan yang diperlukan untuk mencapai suhu beku yang diinginkan. Dengan mengetahui perkiraan lama pembekuan, maka diharapkan tidak akan terjadi lama pembekuan yang terlalu panjang atau terlalu cepat dari yang seharusnya. Dengan demikian dapat dicapai suhu beku disamping tidak terjadi pemborosan energi bila terjadi pembekuan yang terlalu lama dari waktu pembekuan yang seharusnya diperlukan.

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

A. KESIMPULAN

1. Pendugaan laju pembekuan dengan menggunakan metoda beda hingga ternyata memberikan hasil dengan arah dan laju pembekuan yang sesuai dengan percobaan pembekuan.
2. Waktu pembekuan yang diperlukan diantaranya dipengaruhi oleh koefisien konveksi, ketebalan produk dan suhu medium pembekuan. Koefisien konveksi mempengaruhi waktu pembekuan, semakin besar koefisien konveksi akan semakin singkat waktu pembekuan yang diperlukan. Suhu medium berpengaruh pada laju pembekuan dan waktu pembekuan yang diperlukan. Semakin rendah suhu akan semakin cepat waktu pembekuan, disamping itu laju pembekuan akan semakin tinggi.
3. Laju pembekuan rata-rata yang didapat dari perhitungan berdasar pendugaan program komputer ternyata nilainya < 1 cm/jam. Oleh karena itu termasuk laju pembekuan lambat. Untuk mendapatkan laju pembekuan sedang sampai cepat ($w > 1$ cm/jam), suhu pembekuan yang diperlukan sebesar -80°C atau lebih rendah lagi.
4. Dengan informasi hasil pendugaan program komputer dapat diusahakan kondisi pembekuan yang tepat

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

sehingga tercapai hasil akhir produk yang baik dan layak secara ekonomis.

5. Hasil perhitungan persentase simpangan hasil pengukuran numerik terhadap hasil pengukuran percobaan ternyata masih dalam batas ketelitian yang diterima. Untuk ketebalan satu cm, ketelitiannya sebesar 6.5 persen, ketebalan dua cm sebesar 3.3 persen dan ketebalan tiga cm sebesar 4.8 persen.

B. SARAN

1. Dalam penyusunan model matematik untuk pendugaan sifat-sifat termal perlu dipikirkan lebih lanjut cara pengukuran sifat-sifat termal yang tepat. Disarankan untuk pengukuran massa jenis, sampel yang akan diukur dikemas dengan plastik film dan diusahakan seluruh permukaannya terkena udara pembeku. Selain itu juga diusahakan lokasi termokopel yang seragam. Pada pengukuran konduktifitas panas sebaiknya pengukuran dilakukan pada suhu ruangan yang sesuai dengan titik suhu pengukuran yang diinginkan.
2. Disarankan untuk menerapkan program komputer untuk menentukan suhu medium dan ketebalan yang optimum sehingga menghasilkan laju pembekuan yang diinginkan.



DAFTAR PUSTAKA

- Brennan, J.G. 1981. Food Freezing Operations. Applied Science Publisher, Ltd. London.
- Buckle, K.A. et al. 1987. Ilmu Pangan. UI Press. Jakarta.
- Cleland, A.C. dan R.L. Earle. 1977. A comparison of analytical and numerical methods of predicting freezing times of foods. J. Food Sci. 42(5):1390.
- Cleland, A.C. dan R.L. Earle. 1984. Assessment of freezing time prediction methods. J. Food Sci. 49:1034.
- Desrosier, N.W. 1987. Teknologi Pengawetan Pangan. UI Press. Jakarta.
- Desrosier, N.W. dan D.K. Tressler. 1977. Fundamentals of Food Freezing. The AVI Pub. Co. Inc., Westport.
- Fennema, O.R dan W.D. Powrie. 1964. Low temperature of food preservation. Adv. Food Res. 13:219
- Heldman, D.R. dan R.P. Singh. 1981. Food Process Engineering. The AVI Pub. Co. Inc., Westport.
- Mascheroni, R.H. dan A. Calvelo. 1982. A simplified model for freezing time calculations in food. J. Food Sci. 47:1201.
- Pham, Q.T. 1986. Simplified equation for predicting the freezing times of foods. J. Food Technol. 21:209
- Pudjionohadi, C.H. 1987. Mempelajari Laju Pembekuan Udang dalam Tumpukan Berbentuk Balok. Skripsi. Fakultas Teknologi Pertanian, Insitut Pertanian Bogor, Bogor.
- Ramasmawy, H.S. dan M.A. Tung. 1984. A review on predicting freezing times of foods. J. Food Process Engineering. 7:169.
- Succar, J. dan Kan-Ichi Hayakawa. 1984. Parametric analysis for predicting freezing time of infinitely slab-shaped food. J. Food Sci. 49:468.
- Sumoprastowo. 1980. Beternak Kambing Yang Berhasil. Bhratar Karya Aksara. Jakarta.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Susanto, D. 1987. Model Turunan Terbatas Untuk Pendugaan Laju Pembekuan Daging Sapi. Skripsi. Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Bogor.

Tressler, D.K., W.B. Arsdel dan M.J. Copley. 1981. The Freezing Preservation of Foods. The AVI Pub. Co. Inc., Westport.

Winarno, F.G. 1984. Kimia Pangan dan Gizi. PT Gramedia, Jakarta.

Jogiyanto, H.M. 1986. Teori dan Aplikasi Program Komputer Bahasa BASIC. Andi Offset, Yogyakarta.

@Hak cipta milik IPB University

IPB University





@Hak cipta milik IPB University

IPB University

LAMPIRAN

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Lampiran 1. Daftar simbol dalam program komputer

ALFA	:	Difusifitas panas
ALFAMEGA	:	Difusifitas panas sebagai fungsi dari fraksi air beku
ALFANOL	:	Difusifitas panas bahan tidak beku
ALMIN	:	Elemen kiri diagonal matrik
ALPLUS	:	Elemen kanan diagonal matrik
ANDA	:	Variabel pembantu penulisan program
BAGI	:	Variabel pembantu penulisan program
BETA	:	Variabel yang didefinisikan pada persamaan 17
BIOT	:	Bilangan Biot
CIPOK	:	Variabel pembantu penulisan program
CPNOL	:	Panas jenis bahan tidak beku
CPOMEGA	:	Panas jenis sebagai fungsi dari fraksi air beku
DELCP	:	Beda panas jenis es terhadap panas jenis air
DELEX	:	Interval pembagian jarak (Δx)
DELTE	:	Interval waktu perhitungan
DETE	:	Interval waktu perhitungan awal
DWDT	:	Fungsi turunan fraksi air beku terhadap suhu
E	:	Konstanta
E1	:	Konstanta
E2	:	Konstanta
F	:	Konstanta
F1	:	Konstanta



Lampiran 1. (lanjutan)

F2	:	Konstanta
FOURIER	:	Bilangan Fourier
GAMA	:	Parameter pada persamaan 11
KOEF	:	Elemen Matrik
KONAIR	:	Konduktifitas panas air
KONDES	:	Konduktifitas panas es
KONDK	:	Konduktifitas panas bahan tidak beku
KONDL1	:	Variabel pembantu penulisan program
KONDL2	:	Variabel pembantu penulisan program
KONDL3	:	Variabel pembantu penulisan program
KONDL4	:	Variabel pembantu penulisan program
KONON	:	Variabel pembantu penulisan program
KONTE	:	Variabel yang didefinisikan pada persamaan (15)
KOMEGA	:	Konduktifitas panas sebagai fungsi dari fraksi air beku
KOS	:	Variabel pembantu penulisan program
KTENG	:	Konduktifitas panas diantara dua titik numerik
KONV	:	Koefisien pindah panas konveksi
LAMDA	:	Variabel yang didefinisikan pada persamaan (14)
LAMDAF	:	Panas laten pembekuan air
N	:	Jumlah interval pembagian jarak
PRA	:	Sifat termal bahan pada lokasi $n-1/2$
PASCA	:	Sifat termal bahan pada lokasi $n+1/2$
RCPNOL	:	Hasil kali massa jenis dan panas jenis bahan tidak beku



Lampiran 1. (lanjutan)

RCPOMEGA	:	Hasil kali massa jenis dan panas jenis sebagai fungsi dari fraksi air beku
RHOCP	:	Hasil kali massa jenis dan panas jenis
RHOAIR	:	Massa jenis air
RHOES	:	Massa jenis es
RHONL	:	Massa jenis bahan tidak beku
RHOMEGA	:	Massa jenis bahan sebagai fungsi dari fraksi air beku
T	:	Suhu bahan pada titik lokasi n
TA	:	Suhu medium pendingin
TEBAL	:	Tebal daging dihitung dari batas insulasi
TIME	:	Lama pembekuan
TK	:	Suhu bahan dalam derajat Kelvin
TMUL	:	Suhu bahan mula-mula
TNOL	:	Suhu titik beku air murni
TSATU	:	Suhu pusat bahan
TTEPI	:	Suhu permukaan bahan
T1	:	Suhu pusat bahan
T3	:	Suhu pada lapisan ke 3 dari pusat
T6	:	Suhu pada lapisan ke 6 dari pusat
T5	:	Suhu pada lapisan ke 5 dari pusat
T11	:	Suhu pada lapisan ke 11 dari pusat
T8	:	Suhu pada lapisan ke 8 dari pusat
T16	:	Suhu pada lapisan ke 16 dari pusat
YNOL	:	Kadar air bahan

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Lampiran 2. Data pengukuran massa jenis daging kambing pada beberapa titik suhu selama pembekuan

Suhu (oC)	Ulangan	Massa (gr)	Volume (ml)	Massa jenis (kg/m ³)	Rata-rata (kg/m ³)
32	1	58,4900	50,0	1169,800	1169,383
	2	58,5020	50,1	1167,706	
	3	58,5020	49,9	1172,383	
	4	58,4770	50,0	1169,540	
	5	58,4510	50,1	1167,483	
10	1	24,0000	25,0	960,000	1009,108
	2	28,0000	27,5	1014,493	
	3	27,9000	26,5	1052,830	
0	1	21,1000	18,2	1159,341	932,438
	2	26,1000	30,5	856,738	
	3	27,3000	34,9	782,236	
-1	1	21,0000	14,0	1500,000	1148,051
	2	27,4000	27,6	992,754	
	3	33,3000	36,0	924,429	
-2	1	24,8000	30,1	813,116	855,769
	2	24,2000	27,5	880,000	
	3	27,1000	31,0	874,194	
-3	1	60,7000	69,0	879,710	923,121
	2	52,2000	55,2	946,652	
	3	47,2000	50,0	944,000	
-10	1	44,4000	46,0	965,217	995,269
	2	49,9000	50,0	998,000	
	3	54,6000	53,3	1024,390	
-15	1	44,7000	45,2	975,983	1055,367
	2	50,3000	45,2	1112,832	
	3	36,6000	36,0	1017,728	
-18	1	53,1000	53,3	836,220	906,215
	2	45,4200	48,2	942,324	
	3	46,3000	49,3	940,102	

Lampiran 3. Data pengukuran kadar air daging kambing*)

Sample	Ulangan	Kadar air (%)	Rata-rata (%)
I	1	77.2	77.4
	2	77.6	
II	1	71.0	74.4
	2	77.8	
III	1	66.1	65.7
	2	65.3	

*) Hasil pengukuran Laboratorium Balai Besar Industri Hasil Pertanian, Bogor



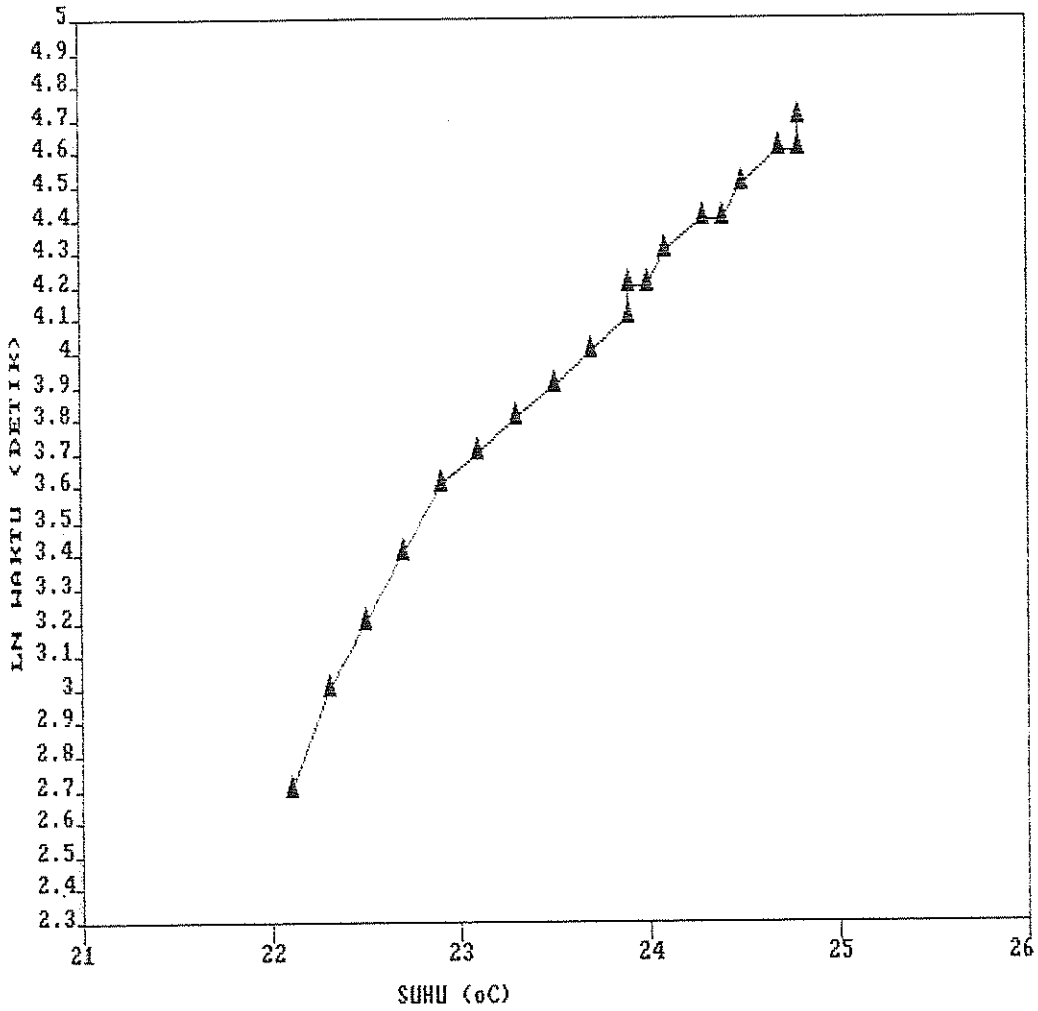
Lampiran 4. Data pengukuran waktu dan suhu gliserol dengan metode "Probe"

@Hak cipta milik IPB University

Waktu (dt)	Suhu (o C)				
	I	II	III	IV	V
5	21.6	23.7	23.5	22.7	23.4
10	22.4	25.8	25.5	24.6	25.2
15	23.8	26.6	26.5	25.6	26.1
20	25.2	27.2	27.2	26.4	26.8
25	25.6	27.8	27.6	26.9	27.4
30	25.8	28.2	28.2	27.3	27.8
35	26.7	28.6	28.3	27.7	28.2
40	27.2	28.9	28.6	28.0	28.5
45	27.3	29.2	28.9	28.3	28.9
50	27.5	29.5	29.1	28.6	29.3
55	27.8	29.7	29.2	28.9	29.6
60	28.1	29.9	29.6	29.1	30.0
65	28.3	30.1	29.8	29.3	30.2
70	28.5	30.3	30.1	29.5	30.4
75	28.6	30.4	30.3	29.7	30.6
80	28.8	30.7	30.5	29.8	30.9
85	29.2	30.9	30.8	30.0	31.2
90	29.3	31.1	30.9	30.2	31.4
95	29.4	31.2	31.1	30.4	31.6
100	29.5	31.4	31.2	30.6	31.8
105	29.7	31.5	31.4	30.7	32.0
110	29.8	31.7	31.5	30.9	32.2

IPB University

Lampiran 5. Contoh plot grafik ln waktu dan suhu gliserol



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Lampiran 6. Contoh perhitungan konstanta (C) alat pengukur konduktifitas panas tipe Probe menggunakan gliserol

Ulangan I

Konduktifitas panas gliserol (k) = 0.284 W/m C

Tahanan heater (R) = 104 Ohm/m

Arus heater = 444 mA

$$q' = I^2 R$$

$$= (0.444)^2 \times 104$$

$$= 20.502 \text{ Watt/m}$$

Suhu 1 (T1) = 27.3 oC

Suhu 2 (T2) = 28.6 oC

Waktu 1 (t1) = 45 detik

Waktu 2 (t2) = 75 detik

$$C = \frac{4 \pi k (T2 - T1)}{q' \ln (t2/t1)}$$

$$= \frac{4 \times 3.14 \times 0.284 \times (28.6 - 27.3)}{20.502 \times \ln (75/45)}$$

$$= 0.44277$$



Lampiran 7. Contoh perhitungan konstanta C alat pengukur konduktifitas termal tipe "Probe"

t		T		Konstanta (C)
1	2	1	2	
30	60	25.9	27.8	0.47691
55	90	29.2	30.5	0.45927
25	55	27.8	29.7	0.41926
20	45	26.4	28.3	0.40764
15	45	26.1	28.9	0.44343

Konstanta (C) rata-rata = 0.44130

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Lampiran 8. Data pengukuran suhu dan waktu daging kambing dengan metode "Probe"

Waktu (dt)	Suhu (o C)		
	I	II	III
0	7.5	7.5	7.5
5	11.2	12.1	11.7
10	14.3	14.1	13.8
15	15.5	15.3	14.9
20	16.2	16.3	15.5
25	16.8	16.8	15.9
30	17.4	17.2	16.3
35	17.8	17.7	16.7
40	18.3	17.9	16.9
45	18.6	18.4	17.2
50	19.0	18.8	17.4
55	19.3	19.0	17.6
60	19.6	19.3	17.8
65	19.8	19.6	18.1
70	20.1	19.8	18.3
75	20.3	20.0	18.5
80	20.5	20.2	18.6
85	20.8	20.5	18.8
90	21.0	20.7	19.0
95	21.2	20.9	19.1
100	21.4	21.1	19.4
105	21.6	21.4	19.5
110	21.8	21.5	19.6
115	22.0	21.7	19.8
120	22.2	21.9	19.9
125	22.5	22.0	20.1

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Lampiran 8. (lanjutan)

Waktu (dt)	Suhu (o C)			
	I	II	III	IV
0	-2.6	-2.6	-2.6	-2.6
5	1.6	0.6	0.7	1.1
10	3.0	2.9	2.6	2.8
15	3.7	3.5	3.1	3.3
20	3.9	3.8	3.4	3.5
25	4.2	4.0	3.6	3.6
30	4.3	4.1	3.7	3.8
35	4.4	4.2	3.7	3.8
40	4.6	4.3	3.7	3.9
45	4.7	4.5	3.8	4.1
50	4.9	4.6	3.9	4.1
55	5.0	4.7	4.1	4.2
60	5.1	4.8	4.1	4.3
65	5.2	4.8	4.2	4.4
70	5.3	4.9	4.3	4.4
75	5.4	5.0	4.4	4.5
80	5.5	5.1	4.6	4.6
85	5.6	5.1	4.7	4.7
90	5.8	5.2	4.8	4.7
95	5.9	5.3	4.8	4.8
100	6.0	5.3	4.9	4.8
105	6.1	5.4	5.1	4.9
110	6.2	5.4	5.2	5.0
115	6.3	5.5	5.3	5.1
120	6.3	5.6	5.3	5.1
125	6.4	5.7	5.4	5.2

Hak cipta milik IPIB University

IPB University

Lampiran 8. (lanjutan)

@Hak cipta milik IPB University

Waktu (dt)	Suhu (o C)			
	I	II	III	IV
0	-3.6	-3.6	-3.6	-3.6
5	0.8	0.4	0.0	-0.2
10	2.4	1.8	1.7	2.2
15	2.8	2.6	2.3	2.8
20	3.2	2.9	2.6	3.1
25	3.3	3.1	2.7	3.3
30	3.5	3.2	2.9	3.4
35	3.6	3.4	3.0	3.5
40	3.7	3.6	3.2	3.6
45	3.8	3.7	3.3	3.6
50	3.9	3.7	3.4	3.7
55	4.0	3.8	3.6	3.8
60	4.1	3.8	3.6	3.9
65	4.2	3.9	3.7	3.9
70	4.3	4.0	3.8	4.0
75	4.3	4.1	3.9	4.1
80	4.4	4.2	4.0	4.1
85	4.5	4.3	4.1	4.2
90	4.6	4.3	4.2	4.2
95	4.7	4.4	4.3	4.3
100	4.7	4.5	4.4	4.4
105	4.8	4.6	4.4	4.4
110	4.9	4.6	4.5	4.5
115	4.9	4.7	4.6	4.5
120	4.9	4.8	4.7	4.6
125	4.9	4.8	4.8	4.6

Lampiran 8. (lanjutan)

Waktu (dt)	Suhu (o C)		
	I	II	III
0	-4.6	-4.6	-4.6
5	-0.8	-0.7	-1.3
10	0.3	0.9	0.1
15	1.4	1.5	0.3
20	1.7	1.8	0.7
25	2.1	1.9	1.0
30	2.3	2.1	1.2
35	2.4	2.2	1.3
40	2.6	2.3	1.4
45	2.7	2.4	1.6
50	2.8	2.5	1.7
55	2.9	2.6	1.7
60	3.1	2.6	1.8
65	3.2	2.7	2.1
70	3.3	2.8	2.2
75	3.3	2.9	2.2
80	3.4	3.0	2.3
85	3.6	3.1	2.3
90	3.7	3.1	2.4
95	3.8	3.2	2.4
100	3.9	3.3	2.4
105	4.0	3.4	2.5
110	4.1	3.4	2.9
115	4.2	3.5	3.2
120	4.3	3.6	3.3
125	4.4	3.7	3.4

@ Hak cipta milik IPB University

IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Lampiran 8. (lanjutan)

Waktu (dt)	Suhu (o C)			
	I	II	III	IV
0	-7.6	-7.6	-7.6	-7.6
5	-3.9	-4.0	-4.0	-2.7
10	-2.4	-2.1	-2.2	-1.4
15	-1.7	-1.4	-1.5	-0.8
20	-1.4	-1.1	-1.2	-0.3
25	-1.1	-0.8	-1.0	0.0
30	-0.9	-0.6	-0.8	0.2
35	-0.8	-0.5	-0.7	0.3
40	-0.6	-0.2	-0.5	0.5
45	-0.5	-0.1	-0.3	0.7
50	-0.3	0.1	-0.3	0.8
55	-0.2	0.2	-0.2	0.9
60	-0.1	0.3	-0.1	1.1
65	0.1	0.4	0.1	1.2
70	0.1	0.6	0.2	1.3
75	0.3	0.8	0.3	1.4
80	0.3	0.9	0.3	1.6
85	0.4	1.0	0.4	1.7
90	0.6	1.1	0.6	1.8
95	0.6	1.2	0.6	1.8
100	0.7	1.3	0.7	1.9
105	0.8	1.4	0.8	2.0
110	0.9	1.6	0.8	2.1
115	1.0	1.7	0.9	2.2
120	1.1	1.7	1.1	2.2
125	1.1	1.8	1.1	2.3

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
 @Hak cipta milik IPB University

IPB University

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Lampiran 8. (lanjutan)

@Hak cipta milik IPB University

Waktu (dt)	Suhu (o C)		
	I	II	III
0	-12.7	-12.7	-12.7
5	-8.2	-8.7	-8.7
10	-6.0	-6.6	-6.2
15	-5.3	-5.8	-5.4
20	-4.7	-5.4	-4.9
25	-4.4	-5.2	-4.6
30	-4.3	-5.0	-4.4
35	-4.0	-4.8	-4.2
40	-3.9	-4.7	-3.9
45	-3.7	-4.5	-3.8
50	-3.6	-4.4	-3.7
55	-3.4	-4.3	-3.5
60	-3.2	-3.9	-3.4
65	-3.1	-3.8	-3.3
70	-3.0	-3.7	-3.2
75	-2.9	-3.6	-3.0
80	-2.8	-3.5	-2.9
85	-2.7	-3.3	-2.8
90	-2.6	-3.2	-2.8
95	-2.5	-3.1	-2.7
100	-2.4	-2.9	-2.7
105	-2.4	-2.9	-2.5
110	-2.3	-2.8	-2.5
115	-2.3	-2.7	-2.4
120	-2.3	-2.6	-2.4
125	-2.2	-2.5	-2.3

Lampiran 8. (lanjutan)

@Hak cipta milik IPB University

Waktu (dt)	Suhu (o C)		
	I	II	III
0	-17.7	-17.7	-17.7
5	-14.0	-13.8	-13.8
10	-12.0	-12.0	-12.0
15	-11.3	-11.1	-11.4
20	-11.0	-10.8	-10.9
25	-10.6	-10.4	-10.5
30	-10.3	-10.2	-10.2
35	-10.0	-9.8	-10.0
40	-9.7	-9.7	-9.7
45	-9.5	-9.4	-9.4
50	-9.2	-9.2	-9.2
55	-8.9	-9.1	-8.9
60	-8.8	-8.9	-8.8
65	-8.6	-8.7	-8.6
70	-8.3	-8.5	-8.4
75	-8.1	-8.3	-8.3
80	-7.8	-8.1	-8.2
85	-7.7	-7.9	-7.9
90	-7.5	-7.8	-7.8
95	-7.3	-7.6	-7.6
100	-7.2	-7.4	-7.5
105	-6.9	-7.3	-7.4
110	-6.7	-7.2	-7.4
115	-6.5	-7.0	-7.2
120	-6.3	-6.8	-7.1
125	-6.2	-6.7	-6.9

Lampiran 8. (lanjutan)

Waktu (dt)	Suhu (o C)		
	I	II	III
0	-20.8	-20.8	-20.8
5	-16.0	-16.7	-16.7
10	-13.5	-14.3	-13.9
15	-12.6	-13.6	-13.0
20	-12.0	-13.1	-12.4
25	-11.4	-12.8	-11.9
30	-11.0	-12.6	-11.5
35	-10.7	-12.4	-11.1
40	-10.4	-12.1	-10.9
45	-10.1	-11.9	-10.4
50	-9.9	-11.8	-10.0
55	-9.5	-11.7	-9.7
60	-9.2	-11.3	-9.3
65	-9.0	-10.3	-9.0
70	-8.7	-9.8	-8.8
75	-8.5	-9.4	-8.6
80	-8.3	-9.1	-8.5
85	-8.1	-8.9	-8.2
90	-7.8	-8.7	-8.0
95	-7.7	-8.4	-7.8
100	-7.4	-8.3	-7.6
105	-7.3	-8.0	-7.4
110	-7.0	-7.8	-7.2
115	-6.9	-7.6	-7.0
120	-6.7	-7.4	-6.8
125	-6.4	-7.3	-6.5

@Hak cipta milik IPB University

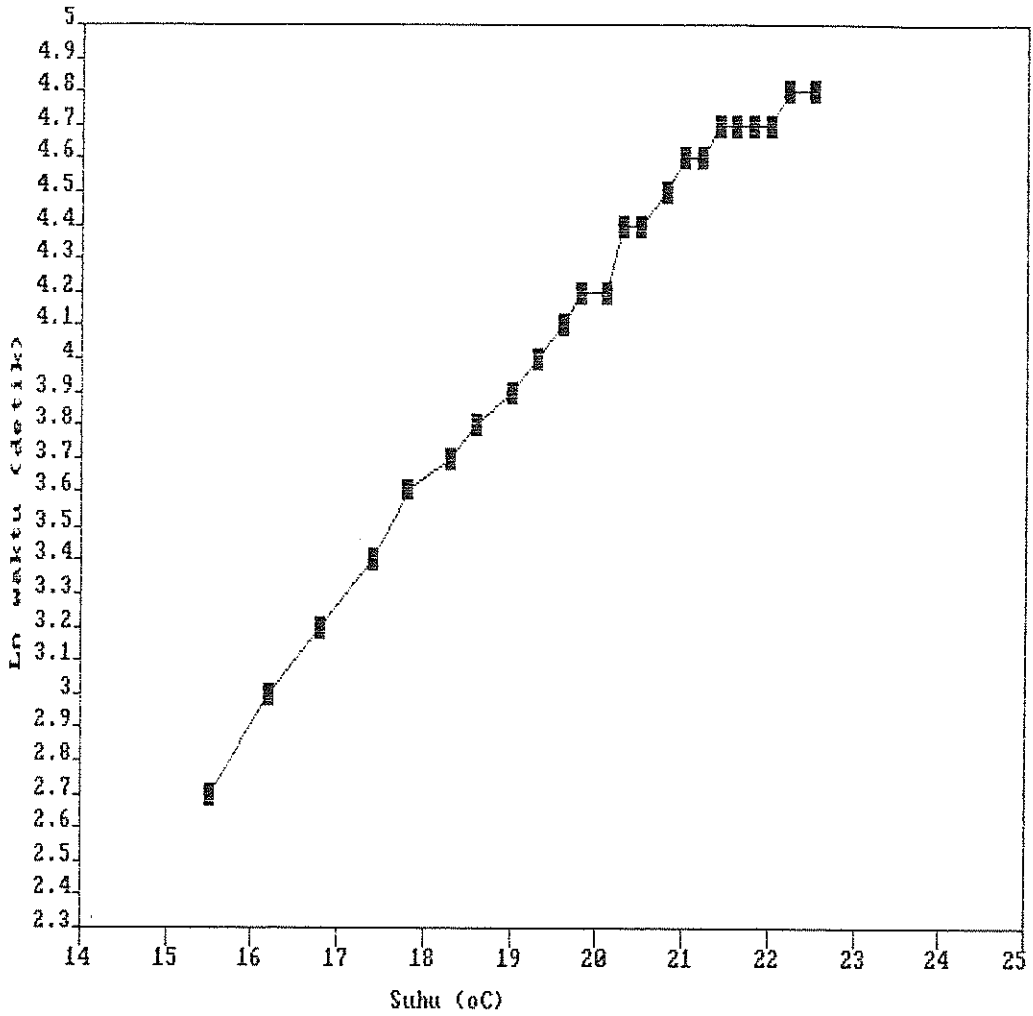
IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Lampiran 9. Contoh plot grafik ln waktu dan suhu daging kambing



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Lampiran 10. Contoh perhitungan konduktifitas panas (k) daging kambing

Pada suhu $-2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$

Ulangan 1

Konstanta (C) = 0.46039

Tahanan (R) = 104 Ohm/m

Arus (I) = 444 mA

$$\begin{aligned} q' &= I^2 R \\ &= (0.444)^2 \times 104 \\ &= 20.502 \text{ W/m} \end{aligned}$$

Suhu 1 (T1) = 280.1 $^{\circ}\text{K}$

Suhu 2 (T2) = 281.1 $^{\circ}\text{K}$

Waktu 1 (t1) = 40 detik

Waktu 2 (t2) = 85 detik

$$\begin{aligned} k &= \frac{C q' \ln (t_2/t_1)}{4 \pi (T_2 - T_1)} \\ &= \frac{0.46039 \times 20.502 \times \ln (85/40)}{4 \times 3.14 \times (281.1 - 280.1)} \\ &= 0.56646 \text{ W/m K} \end{aligned}$$



Lampiran 11. Hasil perhitungan nilai konduktifitas termal daging kambing pada beberapa titik suhu selama pembekuan

Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	t		T		konduktifitas	
	1	2	1	2		
7.5	40	70	291.3	292.6	0.31009	0.33433
	20	40	289.3	290.7	0.35665	
	15	70	290.3	293.6	0.33626	
-2.6	40	65	277.6	278.2	0.58289	0.66196
	45	95	277.5	278.3	0.67282	
	50	75	277.1	277.5	0.73019	
-3.6	35	65	276.6	277.2	0.74320	0.74736
	15	35	275.6	276.4	0.76293	
	45	75	276.6	277.1	0.73594	
-4.6	25	65	275.1	275.9	0.86037	0.82191
	35	55	275.2	275.6	0.81396	
	15	45	273.3	274.3	0.79138	
-5.0	15	60	273.9	275.4	0.66574	0.59390
	15	65	274.2	275.9	0.62133	
	20	60	274.8	276.4	0.49461	
-10.0	20	60	268.3	268.7	1.97845	1.07226
	20	55	267.6	268.3	0.66246	
	40	70	269.1	269.8	0.57588	
-17.7	35	75	263.0	263.5	1.09801	0.59032
	30	65	262.8	264.3	0.37131	
	40	85	263.3	265.1	0.30165	
-20.8	20	85	263.1	264.0	1.15809	0.55527
	70	100	263.2	264.7	0.17129	
	10	40	260.0	262.1	0.33645	



Lampiran 12. Sifat-sifat termal daging kambing

Konduktifitas termal (W/mK)	Massa Jenis (kg/m ³)	Panas Jenis (kJ/kg K)	Suhu titik beku (°C)
0.334 ^{a)}	1169 ^{a)}	3.4875 ^{b)}	-1.1 ^{c)}

- ^{a)} dari hasil pengukuran (lihat lampiran 2 dan 11)
^{b)} dari rumus Dickerson (1969)
^{c)} dari perhitungan persamaan (9)



Lampiran 13. Data masukan program komputer *)

Parameter	Nilai			Satuan
Tebal daging	0.01	0.02	0.03	m
Suhu awal pembekuan	14.7	14.8	15.0	°C
Jumlah interval jarak	5	10	15	-
Interval waktu		24		detik
Suhu medium		-27.2		°C
Koefisien konveksi		21		W/m ² K
Konstanta E		0.9256		-
Konstanta E1		4.749		-
Konstanta E2		-9.29001E-3		-
Konstanta F		3.75897E-3		-
Konstanta F1		-0.006751		-
Konstanta F2		0.002051		-
Titik Beku air murni		273.16		K
Massa jenis daging awal		1169		kg/m ³
Massa jenis es		920		kg/m ³
Massa jenis air murni		1000		kg/m ³
Kadar air daging awal		0.725		-
Beda panas jenis air dan es		2.135		kJ/kg K
Panas laten pembekuan air		334.4		kJ/kg

Lampiran 13. (lanjutan)

Parameter	Nilai	Satuan
Konduktifitas termal daging awal	0.334	W/mK
Konduktifitas matrik	0.0475	W/mK

- *) Hasil pengukuran dan dari nilai-nilai yang telah dikembangkan oleh Mascheroni dan Calvelo (1982)
- a) Berdasar pendekatan dari nilai yang dianjurkan oleh Heldman dan Singh (1981)



Lampiran 14. Program komputer model numerik untuk pendugaan laju pembekuan daging kambing

```
'PROGRAM PENDUGAAN LAJU PEMBEKUAN DAGING KAMBING
'DENGAN MENGGUNAKAN METODA TURUNAN TERBATAS
CLS
COLOR 7,5
FOR I = 1 TO 25
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,178)
NEXT I
COLOR 14,3
LOCATE 5,14:PRINT "
LOCATE 6,14:PRINT "
LOCATE 7,14:PRINT "
COLOR 14,1
FOR J = 1 TO 12
LOCATE J+7,14 :PRINT "
NEXT J
LOCATE 19,14:PRINT "
LOCATE 20,17:PRINT ST
FOR I = 1 TO 14
LOCATE I+6,70:PRINT STRING$(3,177)
NEXT I
COLOR 1,3
LOCATE 6,28:PRINT"MODIFIKASI PROGRAM KOMPUTER"
COLOR 7,1
LOCATE 9,19:PRINT"PROGRAM PENDUGAAN LAJU PEMBEKUAN DAGING KAMBING"
LOCATE 10,27:PRINT"DENGAN METODA TURUNAN TERBATAS"
COLOR 5,1
LOCATE 12,40:PRINT"Oleh
LOCATE 13,34:PRINT"DIAN SARI S. M.
COLOR 0,3
LOCATE 15,29:PRINT "
FOR J = 1 TO 2
LOCATE J+15,29 :PRINT "
NEXT J
LOCATE 17,29:PRINT "
COLOR 16,3
LOCATE 16,36:PRINT "TEKAN SEMBARANG TOMBOL

WHILE NOT INSTAT
WEND
COLOR 7,0
FOR I = 1 TO 25
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,178)
NEXT I
COLOR 14,1
LOCATE 6,14:PRINT "
FOR J = 1 TO 12
LOCATE J+6,14 :PRINT "
```

Lampiran 14. (lanjutan)

```

@Hak cipta milik Ipb University
@NEXT J
LOCATE 18,14:PRINT "
LOCATE 19,17:PRINT STRING$(56,177)
FOR I = 1 TO 11
LOCATE I+7,70:PRINT STRING$(3,177)
NEXT I
COLOR 3,1
LOCATE 8,30:PRINT "INPUT PROGRAM NUMERIK"
COLOR 7,1
LOCATE 10,23:PRINT "Tebal daging (meter)      ="
LOCATE 11,23:PRINT "Jumlah Interval Delta X      ="
LOCATE 12,23:PRINT "Interval Waktu Awal (detik)    ="
LOCATE 13,23:PRINT "Koefisien Konveksi (W/mK)      ="
LOCATE 14,23:PRINT "Suhu medium (oC)              ="
LOCATE 15,23:PRINT "Suhu Awal (oC)                ="
LOCATE 10,54:INPUT " ",TEBAL
LOCATE 11,54:INPUT " ",N
LOCATE 12,54:INPUT " ",DETE
LOCATE 13,54:INPUT " ",KONV
LOCATE 14,54:INPUT " ",TA
LOCATE 15,54:INPUT " ",TMUL

DIM KOMEGA(40),RHOMEGA(40),CPOMEGA(40),RHOCP(40),ALFA(40)
DIM KOEF (40,41),T(41),ALMIN(40),ALPLUS(40)
E=.92561: E1=4.749:E2=-9.290001E-03 'Konstanta
F=3.759E-3:F1=-.006751:F2=.002051 'Konstanta
TNOL=273.16 'Suhu Kristalisasi Air Murni (derajat K)
RHONL=1169 'Densitas (kg/m3)
RHOES=920 'Densitas es (kg/m3)
RHOAIR=1000 'Densitas Air (kg/m3)
YNOL=.725 'Kadar air (desimal)
DELCP=2.135 'dCp (kJ/kgK)
LAMDAF= 334.4 'Panas Kristalisasi Air Murni (kJ/kg)
KONDK=.458 'Konduktifitas Bahan Awal (W/mK)
KONDM=.15 'Konduktifitas matriks serat (W/mK)

DELEX=TEBAL/N
CPNOL=1.675+2.5*YNOL
RCPNOL=RHONL*CPNOL: ALFANOL =KONDK/RCPNOL
TIME=0
FOR I=1 TO N+1
    T(I)=TMUL
NEXT I
CLS
COLOR 3,0
FOR I = 1 TO 25
LOCATE I,2:PRINT STRING$(78,178)
NEXT I

```



Lampiran 14. (lanjutan)

```

COLOR 14,1
LOCATE 8,14:PRINT " _____"
FOR J = 1 TO 10
LOCATE J+8,14 :PRINT "||"

NEXT J
LOCATE 18,14:PRINT " _____"
LOCATE 19,17:PRINT STRING$(56,177)
FOR I = 1 TO 9
LOCATE I+9,70:PRINT STRING$(3,177)
NEXT I
LOCATE 12,21 : PRINT "SIAPKAN DISKET KOSONG UNTUK TRANSFER DATA"
LOCATE 13,36:PRINT "DI DRIVE B"
PRINT
COLOR 21,1
LOCATE 15,23 : ?"TEKAN SEMBARANG TOMBOL UNTUK CONTINUE"

WHILE NOT INSTAT
WEND
CLS : COLOR 0,0

LOCATE 1,50 : color 23,1 : ?" Tunggu ya...! Sedang diolah"

COLOR 7,1

PRINT : PRINT
PRINT " _____"
PRINT
PRINT " WAKTU T(1) T(5) T(11)"
PRINT " _____"
PRINT
PRINT USING "###.### ##.### ##.### ##.###";TIME;T(1);T(5);T(11)

LAGI:
'MEMULAI PUTARAN
'MENGHITUNG SIFAT-SIFAT TERMAL
FOR I=1 TO N+1
IF T(I)>-1.1 THEN GOTO DIEN
GOSUB RANDU
KOMEGA (I)=KOMEGA:RHOMEGA(I)=RHOMEGA:CPOMEGA(I)=CPOMEGA
RHOCP(I)=RCPOMEGA:ALFA(I)=ALFAMEGA:GOTO MTH

DIEN:
KOMEGA(I)=KONDK:RHOMEGA(I)=RHONL:CPOMEGA(I)=CPNOL
RHOCP(I)=RCPNOL:ALFA(I)=ALFANOL

MTH:
NEXT I
FOURIER=ALFANOL*DETE/DELEX^2
DELTE=FOURIER*DELEX^2/ALFA(1)
TIME=TIME+DELTE/60

```

@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Lampiran 14. (lanjutan)

© Hak cipta milik IPB University

```

TSATU=.5*(T(1)+T(2))
KTENG=(KOMEGA(N)+KOMEGA(N+1))/2
BIOT=KONV*DELEX/KTENG
TTEPI=(T(N)+BIOT*TA)/(1+BIOT)
'MODIFIED CRANK-NICHOLSON SCHEME
'MEMBUAT AUGMENTED MATRIK
FOR I=2 TO N
    BAGI=DELTE/2/(DELEX^2)/RHOCP(I)/1000
    FOR J=I-1 TO I+1
        IF J=I-1 THEN GOTO SARI
        IF J=I+1 THEN GOTO BUNGA
        GOTO ELDI
SARI:
    'ELEMEN KIRI DIAGONAL
    PRA=(KOMEGA(J)+KOMEGA(I))/2
    ALMIN(I)=PRA*BAGI
    KOEF(I,J)=-ALMIN(I):GOTO ELDI
BUNGA:
    'ELEMEN KANAN DIAGONAL
    PASCA=(KOMEGA(I)+KOMEGA(J))/2
    ALPLUS(I)=PASCA*BAGI
    KOEF(I,J)=-ALPLUS(I)
ELDI:
    NEXT J
    'ELEMEN DIAGONAL
    KOEF(I,I)=1+ALMIN(I)+ALPLUS(I)
NEXT I
'KONSTANTA RUAS KANAN PERSAMAAN
FOR I=2 TO N
    J=N+1
    IF I=2 THEN GOTO KFIJ
    IF I=N THEN GOTO RKD
    KOEF(I,J)=ALPLUS(I)*(T(I+1)-T(I))-ALMIN(I)*(T(I)-T(I-1))+T(I)
    GOTO BALIK
KFIJ:
    KOEF(I,J)=ALPLUS(2)*(T(3)-T(2))-ALMIN(2)*(T(2)-T(1)-TSATU)+T(2)
    GOTO BALIK
RKD:
    KOEF(I,J)=ALPLUS(I)*(T(I+1)+TTEPI-T(I))-ALMIN(I)*(T(I)-T(I-1))+T(I)
BALIK:
NEXT I
'PERHITUNGAN ELIMINASI GAUSS-SEIDEL
FOR K=2 TO N-1
    FOR I=K+1 TO N
        KOEF=KOEF(I,K)
        FOR J=K TO N+1
            KOEF(I,J)=KOEF(I,J)-KOEF(K,J)*KOEF/KOEF(K,K)
        NEXT J
    NEXT I

```

IPB University

Lampiran 14. (lanjutan)

```

NEXT K
FOR I=N TO 2 STEP -1
    T=0
    FOR R=I+1 TO N
        T=T+KOEFI(I,R)*T(R)
    NEXT R
    T(I)=(KOEFI(I,N+1)-T)/KOEFI(I,I)
NEXT I
T(1)=TSATU
T(N+1)=TTEPI

OPEN "B:DIEN.DAT" FOR APPEND AS #1
PRINT USING "###.###   ###.###   ###.###   ###.###";TIME;T(1);T(5);T(11)
PRINT #1,USING "###.###   ###.###   ###.###   ###.###";TIME;T(1);T(5);T(11)
CLOSE #1

IF T(1)>-18 THEN GOTO LAGI:REM "MENGHITUNG NILAI ALFA LAGI"

PRINT " _____"
PRINT

PRINT "Tebal daging =";" ";
PRINT USING "#.####";TEBAL;:PRINT " meter"
PRINT "Jumlah Interval Delta X =";" ";N
PRINT "Interval Waktu Awal =";" ";DETE;"detik"
PRINT "Koefisien Konveksi =";" ";KONV;"(W/mK)"
PRINT "Suhu medium =";" ";TA;"oC"
PRINT "Suhu Awal =";" ";TMUL;"oC"
STOP

RANDU:

'SUBROUTINE KONDUKTIFITAS, DENSITAS DAN PANAS JENIS
TK=273.16+T(I)
OMEGA=E-F*TK/(TNOL-TK)
GAMA=YNOL*RHONL/RHOAIR
R=RHOAIR/RHOES
RHOMEGA=RHONL/(1+OMEGA*GAMA*(R-1))
KONDES=E1+E2*TK:KONAIR=FI+F2*TK
ALFAK=3*KONDM/(2*KONDM+KONAIR)
BETA=(1-OMEGA)*GAMA/(1-OMEGA*GAMA)
KONTE=KONDM*(1-(1-ALFAK*KONAIR/KONDM)*BETA)/(1+(ALFAK-1)*BETA)
ANDA=1-OMEGA*YNOL*RHOMEGA/RHOES
LAMDA=1-(ANDA^.5)
KONDL1=KONDES*LAMDA^2
KONON=1-LAMDA
KONDL2=KONTE*KONON^2
KONDL3=4*LAMDA*KONON
KONDL4=1/KONTE+1/KONDES

```

Lampiran 14. (lanjutan)

Lampiran 14. (lanjutan)

```

KOMEGA=KONDES*LAMDA+KONON*(KONDL1+KONDL2+KONDL3/KONDL4)
DWDT=-F*TNOL/((TNOL-TK)^2)
CIPOK=YNOL*(LAMDAF+DELCP*(TK-TNOL))*DWDT
CPOMEGA=CPNOL-OMEGA*YNOL*DELCP-CIPOK
RCPOMEGA=RHOMEGA*CPOMEGA:ALFAMEGA=KOMEGA/RCPOMEGA
RETURN

```

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang membuat, sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Lampiran 15. Penjelasan program komputer

Program komputer yang dipakai untuk pendugaan laju pembekuan daging kambing ini merupakan modifikasi program yang telah dibuat oleh Didik Susanto dan Christ Pujiono Hadi.

Program dimulai dengan perintah yang mengatur tampilan keluaran program. Baris-baris selanjutnya digunakan untuk memasukkan input data yang sesuai dengan kondisi awal percobaan. Input dari program ini dimasukkan melalui dua cara, yaitu dengan perintah input dan ditulis langsung dalam program komputer. Perintah input dipakai untuk memasukkan nilai input yang bersifat tidak tetap, dapat diubah-ubah sesuai dengan keinginan.

Setelah input data dimasukkan, maka program akan menghitung sifat-sifat termal bahan. Sifat-sifat termal bahan tidak beku dianggap sama dengan sifat termal bahan awal. Setelah mencapai titik beku kemudian sifat termal akan dihitung dengan GOSUB RANDU.

Di bawah perintah GOSUB RANDU terdapat baris program yang berfungsi untuk menghitung bilangan Fourier pada pusat ketebalan bahan yang dihitung berdasarkan sifat diffusifitas panas bahan awal, interval waktu perhitungan (Δt) awal dan ketebalan lapisan tipis. Nilai interval waktu perhitungan (t) awal sebagai masukan harus disesuaikan dengan syarat nilai bilangan Fourier, yaitu $\leq \frac{1}{2}$. Bilangan Fourier



tersebut selanjutnya dipakai sebagai konstanta untuk menghitung interval waktu perhitungan pada setiap iterasi.

Suhu pada pusat termal bahan dihitung dengan statement TSATU, sedang statement TTEPI dimaksudkan untuk menghitung suhu permukaan yang berhubungan langsung dengan medium pendingin. Perhitungan konduktifitas termal dilakukan pada pertengahan dua titik numerik terluar, yaitu pada lapisan permukaan dan lapisan pertama di bawah permukaan.

Baris selanjutnya digunakan untuk membuat "augmented matrik" yang kemudian akan dipakai untuk mencari suhu-suhu pada titik numerik yang belum diketahui. Perhitungan konduktifitas panas bahan tetap dilakukan pada pertengahan dua titik numerik.

Matrik yang telah dibuat kemudian diolah dengan metoda eliminasi Gauss Seidel untuk mendapatkan variabel suhu (T) yang belum diketahui.

Hasil keluaran program akan ditampilkan di layar monitor pada titik-titik numerik yang diinginkan. Dalam penelitian ini suhu yang dicetak adalah suhu pusat, suhu sekitar setengah ketebalan dan suhu permukaan. Selain ditampilkan pada layar, hasil keluaran juga disimpan dalam file "DIEN.DAT" yang telah dibuka dengan perintah OPEN. Hasil keluaran yang telah disimpan dalam file "DIEN.DAT" ini dapat dibuka menggunakan program paket "Word Star".

Jika suhu pusat bahan belum mencapai -18°C , maka perintah RETURN dari GOSUB RANDU memungkinkan putaran



perhitungan dilakukan lagi. Bila suhu pusat telah mencapai -18°C , maka file "DIEN.DAT" ditutup dengan pernyataan CLOSE. Setelah itu pada baris selanjutnya program perhitungan dihentikan.

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip, sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Lampiran 16. Contoh hasil pendugaan numerik laju pembekuan daging kambing dengan ketebalan 1 cm

Waktu Pem- bekuan (menit)	T(1)	T(3) (°C)	T(6)
5.200	12.877	11.061	3.058
10.000	9.071	7.145	-0.388
15.200	5.037	3.205	-2.156
20.000	1.919	0.799	-2.714
25.200	0.037	-0.582	-2.861
30.000	-0.834	-1.076	-3.185
34.800	-1.090	-1.131	-3.494
35.200	-1.097	-1.136	-3.516
35.600	-1.101	-1.141	-3.537
60.164	-1.103	-1.576	-3.558
84.516	-1.147	-2.341	-4.044
04.774	-1.352	-2.577	-4.220
15.208	-1.714	-2.886	-4.627
19.959	-1.986	-2.971	-4.748
25.343	-2.404	-3.249	-5.073
30.089	-2.874	-3.599	-5.409
35.737	-3.602	-4.196	-5.897
40.378	-4.374	-4.874	-6.455
45.291	-5.401	-5.823	-7.266
50.091	-6.657	-7.019	-8.324
55.019	-8.231	-8.541	-9.702
60.047	-10.096	-10.360	-11.373
65.086	-12.122	-12.345	-13.215
70.049	-14.136	-14.324	-15.062
75.005	-16.053	-16.210	-16.829
80.585	-18.005	-18.132	-18.636

Lampiran 17. Contoh hasil pendugaan numerik laju pembekuan daging kambing dengan ketebalan 2 cm

Waktu pem- bekuan (menit)	T(1)	T(5) (°C)	T(11)
5.200	14.758	14.146	3.145
10.000	14.228	12.499	0.008
15.200	12.990	10.570	-2.597
20.000	11.505	8.764	-2.720
25.200	9.722	6.943	-2.744
30.000	8.104	5.571	-2.827
35.200	6.523	4.288	-3.023
40.000	5.228	3.239	-3.323
45.200	3.998	2.301	-3.536
50.000	3.020	1.534	-3.658
55.200	2.092	0.797	-3.845
60.000	1.356	0.283	-4.060
65.200	0.694	-0.219	-4.256
70.000	0.182	-0.525	-4.423
75.200	-0.247	-0.810	-4.617
80.000	-0.563	-0.972	-4.792
86.000	-0.836	-1.102	-4.996
90.000	-0.956	-1.116	-5.133
95.200	-1.049	-1.163	-5.310
100.000	-1.090	-1.244	-5.467
104.000	-1.100	-1.346	-5.595
129.407	-1.100	-2.022	-5.633
154.005	-1.105	-2.687	-5.851
178.102	-1.134	-2.994	-6.006
199.408	-1.250	-3.386	-6.245
213.483	-1.508	-3.526	-6.423
220.615	-1.778	-3.686	-6.631
224.874	-1.987	-3.742	-6.767
230.414	-2.306	-3.895	-7.005
235.848	-2.662	-4.096	-7.261
240.893	-3.037	-4.340	-7.500
245.514	-3.430	-4.619	-7.733
250.348	-3.901	-4.973	-8.001
255.046	-4.422	-5.384	-8.300
260.206	-5.068	-5.918	-8.690
265.107	-5.753	-6.508	-9.132
270.190	-6.536	-7.208	-9.673



Lampiran 17. (lanjutan)

Waktu pem- bekuan (menit)	T(1)	T(5) (°C)	T(11)
275.082	-7.358	-7.963	-10.277
280.105	-8.268	-8.814	-10.975
285.419	-9.293	-9.785	-11.789
290.020	-10.221	-10.673	-12.543
295.040	-11.261	-11.673	-13.403
300.023	-12.306	-12.682	-14.278
305.010	-13.347	-13.689	-15.157
310.035	-14.375	-14.687	-16.033
315.052	-15.370	-15.654	-16.884
320.026	-16.315	-16.573	-17.696
325.058	-17.222	-17.456	-18.479
329.651	-18.003	-18.217	-19.155

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Lampiran 18. Contoh hasil pendugaan numerik laju pembekuan daging kambing dengan ketebalan 3 cm

Waktu pembekuan (menit)	T(1)	T(8) (°C)	T(16)
0.000	15.000	15.000	15.000
5.200	15.000	14.837	3.289
10.000	14.973	14.024	0.138
15.200	14.796	12.797	-2.393
20.000	14.428	11.589	-2.735
25.200	13.823	10.310	-2.705
30.000	13.115	9.290	-2.739
35.200	12.257	8.334	-2.831
40.000	11.432	7.536	-3.001
45.200	10.538	6.725	-3.306
50.000	9.727	6.026	-3.513
55.200	8.873	5.328	-3.628
60.000	8.115	4.712	-3.736
65.200	7.327	4.064	-3.928
70.000	6.630	3.527	-4.122
75.200	5.910	2.988	-4.274
80.000	5.282	2.500	-4.387
85.200	4.637	1.995	-4.536
90.000	4.071	1.601	-4.697
97.600	3.243	0.998	-4.917
100.000	2.999	0.805	-4.978
105.200	2.491	0.472	-5.120
110.000	2.054	0.193	-5.262
115.200	1.619	-0.124	-5.410
120.000	1.245	-0.332	-5.537
125.200	0.875	-0.535	-5.677
130.000	0.568	-0.749	-5.809
135.200	0.263	-0.869	-5.947
140.000	0.013	-0.983	-6.071
145.200	-0.223	-1.110	-6.205
150.000	-0.416	-1.136	-6.329
155.200	-0.591	-1.204	-6.460
160.000	-0.728	-1.311	-6.579
165.200	-0.847	-1.464	-6.707
170.000	-0.932	-1.629	-6.824
175.200	-1.002	-1.815	-6.949
180.000	-1.046	-1.981	-7.062
185.199	-1.076	-2.154	-7.183
190.399	-1.093	-2.324	-7.302

Lampiran 18. lanjutan

Waktu pem- bekuan (menit)	T(1)	T(8) (°C)	T(16)
195.199	-1.099	-2.479	-7.410
196.399	-1.100	-2.517	-7.436
198.799	-1.100	-2.593	-7.490
223.423	-1.100	-3.225	-7.498
248.047	-1.101	-3.640	-7.622
272.552	-1.108	-3.973	-7.731
296.330	-1.138	-4.274	-7.887
317.317	-1.237	-4.514	-8.025
331.983	-1.446	-4.685	-8.187
340.204	-1.683	-4.787	-8.320
345.233	-1.877	-4.856	-8.453
351.735	-2.177	-4.967	-8.655
356.220	-2.406	-5.061	-8.811
361.250	-2.684	-5.190	-8.990
365.170	-2.916	-5.309	-9.132
370.322	-3.247	-5.492	-9.316
375.161	-3.587	-5.695	-9.490
380.278	-3.982	-5.943	-9.681
385.380	-4.414	-6.229	-9.886
390.342	-4.870	-6.546	-10.107
395.122	-5.344	-6.890	-10.344
400.249	-5.885	-7.302	-10.632
405.064	-6.424	-7.729	-10.935
410.027	-7.006	-8.209	-11.284
415.054	-7.622	-8.732	-11.675
420.101	-8.264	-9.292	-12.102
425.018	-8.908	-9.866	-12.549
430.081	-9.589	-10.481	-13.036
435.037	-10.267	-11.102	-13.534
440.021	-10.958	-11.740	-14.051
445.040	-11.658	-12.391	-14.583
450.013	-12.350	-13.039	-15.117
457.716	-13.412	-14.037	-15.947
460.075	-13.733	-14.340	-16.199
465.031	-14.398	-14.968	-16.725
470.015	-15.051	-15.586	-17.245
475.040	-15.691	-16.194	-17.757
480.045	-16.309	-16.781	-18.254
485.045	-16.905	-17.348	-18.735
490.051	-17.480	-17.895	-19.199
494.815	-18.004	-18.395	-19.625

Lampiran 20. Data percobaan pembekuan daging kambing dengan ketebalan 1 cm menggunakan "air blast freezer"

Waktu (menit)	Suhu (°C)						
	I		II		III		Rata-rata
	Daging	Udara	Daging	Udara	Daging	Udara	Daging
0	15.0	-21.8	14.3	-22.0	14.7	-22.8	14.7
5	11.6	-23.7	12.4	-24.0	12.4	-24.4	12.1
10	6.5	-24.3	8.0	-24.6	7.1	-24.8	7.2
15	2.8	-25.1	6.0	-25.6	4.9	-25.9	4.6
20	1.5	-25.6	4.8	-25.7	3.7	-26.1	3.3
25	-0.6	-25.6	2.9	-26.0	2.0	-26.4	1.4
30	-1.8	-26.0	1.3	-26.3	0.9	-26.6	0.1
35	-2.2	-26.0	-0.1	-26.5	0.2	-27.0	-0.7
40	-2.1	-26.4	-0.9	-26.7	-0.1	-27.2	-1.0
45	-2.0	-26.6	-1.1	-27.0	-0.2	-27.4	-1.1
50	-1.7	-26.9	-0.8	-27.0	-0.5	-27.6	-1.0
55	-1.7	-27.0	-0.6	-27.3	-0.3	-27.7	-0.9
60	-1.7	-27.2	-0.5	-27.5	-0.3	-27.9	-0.8
65	-1.7	-27.2	-0.6	-27.5	-0.2	-28.0	-0.8
70	-1.7	-27.4	-0.6	-27.7	-0.2	-28.3	-0.8
75	-1.7	-27.5	-0.7	-28.0	-0.2	-28.5	-0.9
80	-1.7	-27.6	-0.6	-28.0	-0.2	-28.6	-0.8
85	-1.8	-27.7	-0.7	-28.2	-0.2	-28.7	-0.9
90	-1.8	-27.9	-0.7	-28.5	-0.2	-28.8	-0.9
95	-1.9	-28.0	-0.7	-28.5	-0.2	-29.0	-0.9
100	-2.0	-28.3	-0.7	-28.7	-0.2	-29.0	-1.0
105	-2.0	-28.3	-0.7	-28.7	-0.2	-29.1	-1.0
110	-2.2	-28.5	-0.8	-28.8	-0.2	-29.1	-1.1
115	-2.3	-28.5	-0.8	-28.8	-0.3	-29.1	-1.1
120	-2.5	-28.3	-0.9	-28.8	-0.3	-29.2	-1.2
125	-2.8	-28.6	-0.9	-28.8	-0.3	-29.3	-1.3
130	-3.3	-28.6	-1.0	-28.8	-0.5	-29.2	-1.6
135	-4.2	-28.6	-1.1	-28.8	-0.7	-29.2	-2.0
140	-5.7	-28.6	-1.1	-28.8	-0.8	-29.2	-2.5
145	-7.9	-28.5	-1.3	-28.8	-1.1	-29.1	-3.4
150	-11.4	-28.5	-1.4	-28.8	-1.8	-29.1	-4.8



Lampiran 20. (lanjutan)

Waktu (menit)	Suhu (oC)						
	I		II		III		Rata-rata
	Daging	Udara	Daging	Udara	Daging	Udara	Daging
155	-13.5	-28.5	-1.5	-28.8	-4.1	-29.0	-6.3
160	-15.6	-28.5	-1.8	-28.6	-7.0	-29.0	-8.1
165	-17.4	-28.5	-2.9	-28.6	-10.5	-28.9	-10.3
170	-18.9	-28.5	-5.7	-28.6	-13.5	-28.8	-12.7
175	-20.1	-28.4	-9.2	-28.6	-15.8	-28.8	-15.0
180	-21.2	-28.3	-11.6	-28.6	-17.6	-28.8	-16.8
185	-22.1	-28.3	-13.8	-28.6	-19.5	-28.8	-18.4
190			-15.7	-28.6			
195			-17.1	-28.6			
200			-18.4	-28.6			
		-27.3		-27.7		-28.0	

Suhu udara permukaan rata-rata = -27.7 oC
 Tebal daging = 1 cm
 Suhu "Air Blast Freezer" = -30 oC



Lampiran 21. Data percobaan pembekuan daging kambing dengan ketebalan 2 cm menggunakan "air blast freezer"

Waktu (menit)	Suhu (oC)						
	I		II		III		Rata-rata
	Daging	Udara	Daging	Udara	Daging	Udara	Daging
9	14.8	-22.3	14.6	-22.2	14.9	-22.2	14.8
5	13.1	-23.2	13.0	-23.3	14.0	-22.8	13.4
10	11.3	-24.4	11.2	-24.5	12.1	-23.1	11.5
15	9.8	-25.0	9.9	-25.1	10.5	-23.1	10.0
20	8.4	-25.4	8.4	-25.4	9.0	-23.4	8.6
25	7.0	-25.6	7.1	-25.6	7.5	-23.5	7.2
30	5.7	-25.6	5.8	-25.7	6.0	-23.5	5.9
35	4.3	-25.7	4.4	-25.7	4.8	-23.6	4.5
40	3.1	-25.8	3.4	-25.8	3.5	-23.7	3.3
45	1.8	-25.8	2.4	-25.9	2.3	-23.7	2.1
50	0.9	-25.9	1.4	-26.0	1.3	-23.8	1.2
55	0.1	-26.0	0.6	-26.1	0.6	-24.1	0.4
60	-0.7	-26.1	0.1	-26.2	-0.1	-24.1	-0.2
65	-1.2	-26.4	-0.6	-26.4	-0.7	-24.6	-0.8
70	-1.4	-26.5	-0.9	-26.7	-1.1	-24.1	-1.1
75	-1.7	-26.5	-1.2	-26.9	-1.3	-24.6	-1.4
80	-1.5	-26.8	-1.4	-27.1	-0.5	-25.0	-1.1
85	-0.7	-27.1	-1.5	-27.3	-0.6	-25.5	-0.9
90	-0.9	-27.1	-1.7	-27.5	-0.6	-25.4	-1.0
95	-1.1	-27.4	-0.7	-27.7	-0.7	-25.4	-0.8
100	-1.1	-27.7	-0.8	-27.8	-0.8	-25.7	-0.9
105	-1.0	-27.8	-0.8	-28.2	-0.9	-25.9	-0.9
110	-1.0	-28.0	-0.8	-28.3	-0.9	-26.1	-0.9
115	-0.9	-28.2	-0.8	-28.3	-0.9	-26.1	-0.8
120	-0.9	-28.2	-0.7	-28.3	-0.8	-25.6	-0.8
125	-0.8	-28.2	-0.7	-28.5	-0.8	-25.7	-0.7
130	-0.8	-28.3	-0.7	-28.5	-0.8	-25.8	-0.7
135	-0.9	-28.3	-0.8	-28.5	-0.8	-25.7	-0.8
140	-1.0	-28.3	-0.8	-28.6	-0.6	-25.9	-0.8
145	-1.0	-28.3	-0.8	-28.5	-0.7	-25.9	-0.8
150	-1.0	-28.0	-0.9	-28.4	-0.5	-25.9	-0.8
155	-1.1	-27.9	-0.9	-28.4	-0.5	-25.9	-0.8
160	-1.2	-27.8	-1.0	-28.2	-0.5	-25.9	-0.9
165	-1.2	-27.8	-1.0	-28.2	-0.3	-25.9	-0.8
170	-1.3	-27.8	-1.1	-28.0	-0.5	-25.9	-0.9

Lampiran 21. (lanjutan)

Waktu (menit)	Suhu (oC)						
	I		II		III		Rata-rata Daging
	Daging	Udara	Daging	Udara	Daging	Udara	
175	-1.4	-27.8	-1.2	-28.2	-0.5	-25.9	-1.0
180	-1.5	-27.9	-1.2	-28.0	-0.5	-26.0	-1.0
185	-1.6	-27.7	-1.3	-28.0	-0.6	-25.8	-1.1
190	-1.7	-27.8	-1.3	-28.0	-0.6	-25.6	-1.2
195	-1.8	-27.9	-1.4	-28.2	-0.7	-25.6	-1.3
200	-1.9	-27.9	-1.4	-28.2	-0.8	-25.6	-1.3
205	-2.0	-28.2	-1.5	-28.3	-0.8	-25.7	-1.4
210	-2.2	-28.0	-1.5	-28.3	-0.8	-25.7	-1.5
215	-2.4	-28.2	-1.5	-28.4	-0.8	-25.8	-1.5
220	-2.7	-28.2	-1.5	-28.4	-0.9	-25.9	-1.7
225	-3.0	-28.2	-1.5	-28.5	-1.1	-25.8	-1.8
230	-3.3	-28.2	-1.5	-28.5	-1.2	-25.6	-2.0
235	-4.0	-28.3	-1.5	-28.5	-1.4	-26.1	-2.3
240	-4.8	-28.4	-1.5	-28.7	-1.9	-25.9	-2.7
245	-5.8	-28.5	-1.6	-28.6	-2.9	-26.0	-3.4
250	-6.7	-28.5	-1.7	-28.6	-4.2	-26.4	-4.2
255	-7.8	-28.6	-2.1	-28.6	-6.5	-26.0	-5.5
260	-8.9	-28.6	-3.1	-28.6	-8.3	-25.9	-6.8
265	-10.2	-28.6	-3.8	-28.5	-10.3	-26.2	-8.1
270	-11.2	-28.6	-4.8	-28.5	-11.5	-26.1	-9.1
275	-12.2	-28.6	-7.1	-28.5	-12.0	-26.6	-10.4
280	-13.2	-28.2	-8.7	-28.5	-13.0	-26.7	-11.6
285	-14.0	-28.3	-10.0	-28.5	-14.1	-26.3	-12.7
290	-14.9	-28.3	-11.2	-28.3	-15.3	-26.8	-13.8
295	-15.7	-28.3	-12.1	-28.3	-16.1	-26.8	-14.6
300	-16.4	-28.3	-12.9	-28.2	-17.0	-27.0	-15.4
305	-17.2	-28.2	-13.8	-28.0	-17.9	-27.0	-16.3
310	-17.9	-28.3	-14.7	-28.3	-18.9	-27.1	-17.2
315	-18.5	-28.3	-15.5	-28.3	-19.5	-27.1	-17.8
320	-19.2	-28.3	-16.3	-28.3	-20.2	-27.2	-18.5
		-27.4		-27.6		-25.5	

Suhu udara permukaan rata-rata = -26.8 oC
 Tebal daging = 2 cm
 Suhu "Air Blast Freezer" = -30 oC

Lampiran 22. Data percobaan pembekuan daging kambing dengan ketebalan 3 cm menggunakan "air blast freezer"

Waktu (menit)	Suhu (°C)						
	I		II		III		Rata-rata
	Daging	Udara	Daging	Udara	Daging	Udara	Daging
0	14.9	-22.3	15.1	-22.2	15.0	-22.3	15.0
5	13.7	-22.8	13.9	-22.8	13.9	-22.8	13.8
10	13.3	-23.1	13.6	-23.0	13.6	-23.0	13.5
15	12.7	-23.5	13.3	-23.4	13.0	-23.4	13.0
20	11.6	-23.9	12.0	-23.8	11.8	-23.8	11.8
25	11.0	-24.3	11.5	-24.3	11.4	-24.3	11.3
30	10.4	-24.8	11.1	-24.8	11.0	-24.8	10.8
35	9.9	-25.0	10.6	-25.0	10.4	-25.0	10.3
40	9.3	-25.0	10.2	-25.0	10.0	-25.0	9.8
45	8.7	-25.4	9.6	-25.4	9.5	-25.3	9.3
50	8.1	-25.7	9.4	-25.7	9.0	-25.3	8.8
55	7.5	-25.7	8.9	-25.7	8.5	-25.6	8.3
60	6.7	-25.7	8.4	-25.7	8.0	-25.7	7.7
65	5.7	-25.8	7.5	-25.8	7.4	-25.7	6.9
70	5.2	-25.8	6.9	-25.8	6.8	-25.8	6.3
75	4.4	-25.8	6.1	-25.8	6.0	-25.8	5.5
80	4.0	-25.9	5.3	-25.9	5.2	-25.9	4.8
85	3.6	-25.9	4.4	-25.9	4.3	-25.8	4.1
90	1.9	-25.9	3.8	-25.9	3.7	-25.9	3.1
95	1.0	-26.1	2.8	-26.1	2.9	-26.1	2.2
100	1.4	-26.4	2.2	-26.2	2.4	-26.4	2.0
105	-0.1	-26.7	1.6	-26.5	1.9	-26.6	1.1
110	-0.7	-26.7	1.0	-26.5	1.5	-26.7	0.6
115	-1.2	-27.0	0.4	-26.8	1.1	-26.9	0.1
120	-1.5	-27.0	-0.1	-26.9	0.6	-27.0	-0.3
125	-1.7	-27.1	-0.3	-26.9	0.3	-27.2	-0.6
130	-2.0	-27.2	-0.7	-27.1	0.1	-27.2	-0.9
135	-2.2	-27.2	-1.0	-27.1	-0.3	-27.1	-1.2
140	-2.2	-27.1	-1.2	-27.0	-0.5	-27.2	-1.3
145	-2.3	-27.4	-1.4	-27.1	-0.7	-27.4	-1.4
150	-2.4	-27.4	-1.6	-27.3	-0.9	-27.4	-1.6
155	-2.4	-27.5	-1.7	-27.2	-1.0	-27.4	-1.7
160	-2.2	-27.6	-1.7	-27.5	-1.0	-27.5	-1.6
165	-1.9	-27.5	-1.5	-27.2	-0.7	-27.4	-1.3
170	-2.0	-27.6	-1.5	-27.3	-0.7	-27.5	-1.4
175	-1.9	-27.4	-1.4	-27.4	-0.6	-27.4	-1.3
180	-1.9	-27.5	-1.4	-27.4	-0.3	-27.5	-1.2
185	-1.9	-27.5	-1.4	-27.4	-0.3	-27.4	-1.2

Lampiran 22. (lanjutan)

Waktu (menit)	Suhu (oC)						
	I		II		III		Rata-rata
	Daging	Udara	Daging	Udara	Daging	Udara	Daging
390	-2.4	-28.5	-1.9	-28.3	-1.8	-28.4	-2.0
395	-2.5	-28.5	-2.0	-28.2	-2.5	-28.4	-2.3
400	-3.8	-28.5	-2.0	-28.2	-3.2	-28.4	-3.0
405	-5.0	-28.5	-2.1	-28.3	-4.2	-28.4	-3.8
410	-6.1	-28.5	-2.2	-28.3	-5.3	-28.4	-4.5
415	-7.1	-28.4	-2.2	-28.2	-6.5	-28.3	-5.3
420	-8.3	-28.3	-2.3	-28.2	-7.8	-28.3	-6.1
425	-9.3	-28.3	-2.4	-28.2	-8.8	-28.3	-6.9
430	-10.3	-28.2	-2.5	-28.2	-9.8	-28.3	-7.5
435	-11.1	-28.3	-2.8	-28.2	-10.6	-28.2	-8.1
440	-12.0	-28.3	-3.3	-28.3	-11.5	-28.3	-8.9
445	-12.8	-28.5	-3.9	-28.2	-12.4	-28.3	-9.7
450	-13.4	-28.3	-4.6	-28.3	-13.0	-28.3	-10.3
455	-14.0	-28.3	-5.5	-28.2	-13.7	-28.2	-11.1
460	-14.7	-28.3	-6.4	-28.2	-14.4	-28.3	-11.8
465	-15.4	-28.4	-7.4	-28.4	-15.1	-28.3	-12.6
470	-16.0	-28.4	-8.2	-28.3	-15.8	-28.3	-13.4
475	-16.5	-28.5	-8.9	-28.2	-16.4	-28.4	-14.0
480	-17.1	-28.5	-9.7	-28.3	-17.0	-28.5	-14.6
485	-17.8	-28.5	-10.4	-28.3	-17.7	-28.4	-15.3
490	-18.1	-28.5	-11.0	-28.4	-18.1	-28.4	-15.7
495	-18.9	-28.4	-11.7	-28.3	-18.7	-28.4	-16.4
500	-19.4	-28.5	-12.4	-28.3	-19.3	-28.4	-17.0
505	-19.8	-28.5	-13.0	-28.3	-19.9	-28.4	-17.5
510	-20.2	-28.4	-13.5	-28.3	-20.2	-28.3	-17.9
515	-20.6	-28.4	-14.1	-28.3	-20.8	-28.4	-18.5
520			-14.7	-28.3			
525			-15.2	-28.3			
530			-15.7	-28.3			
535			-16.2	-28.3			
540			-16.8	-28.3			
545			-17.3	-28.3			
550			-17.8	-28.3			
555			-18.2	-28.3			
		-27.4		-27.3		-27.4	

Suhu udara permukaan rata-rata = -27.4 oC

Tebal daging = 3 cm

Suhu "Air Blast Freezer" = -30 oC

Lampiran 22. (lanjutan)

Waktu (menit)	Suhu (°C)						
	I		II		III		Rata-rata
	Daging	Udara	Daging	Udara	Daging	Udara	Daging
190	-1.8	-27.5	-1.3	-27.5	-0.3	-27.5	-1.1
195	-1.9	-27.6	-1.3	-27.4	-0.3	-27.6	-1.2
200	-1.8	-27.5	-1.2	-27.1	-0.2	-27.5	-1.1
205	-1.7	-27.4	-1.2	-27.3	-0.2	-27.5	-1.0
210	-1.7	-27.4	-1.1	-27.4	-0.1	-27.5	-1.0
215	-1.6	-27.5	-1.1	-27.3	0.0	-27.5	-0.9
220	-1.5	-27.5	-1.0	-27.2	0.0	-27.5	-0.8
225	-1.6	-27.5	-1.0	-27.4	0.0	-27.6	-0.9
230	-1.7	-27.7	-1.1	-27.5	-0.1	-27.7	-1.0
235	-1.7	-27.6	-1.0	-27.5	0.1	-27.7	-0.9
240	-1.7	-27.9	-1.0	-27.7	0.1	-27.7	-0.9
245	-1.7	-27.9	-1.0	-27.7	0.1	-27.9	-0.9
250	-1.7	-27.8	-1.0	-27.7	0.1	-27.9	-0.9
255	-1.8	-28.0	-1.1	-27.9	-0.1	-28.0	-1.0
260	-1.8	-28.0	-1.2	-27.8	-0.1	-28.0	-1.0
265	-1.8	-28.2	-1.3	-27.9	-0.3	-28.2	-1.1
270	-1.9	-28.2	-1.3	-28.0	-0.3	-28.3	-1.2
275	-2.0	-28.2	-1.4	-28.2	-0.5	-28.3	-1.3
280	-2.0	-28.2	-1.4	-28.0	-0.5	-28.3	-1.3
285	-2.1	-28.4	-1.5	-28.2	-0.6	-28.3	-1.4
290	-2.1	-28.3	-1.5	-28.0	-0.6	-28.3	-1.4
295	-2.1	-28.4	-1.5	-28.0	-0.6	-28.2	-1.4
300	-2.1	-28.3	-1.5	-28.2	-0.6	-28.4	-1.4
305	-2.1	-28.3	-1.6	-28.3	-0.7	-28.3	-1.4
310	-2.1	-28.3	-1.6	-28.2	-0.6	-28.3	-1.4
315	-2.1	-28.3	-1.6	-28.2	-0.6	-28.3	-1.4
320	-2.1	-28.2	-1.5	-28.2	-0.5	-28.3	-1.3
325	-2.2	-28.3	-1.6	-28.0	-0.6	-28.3	-1.4
330	-2.2	-28.3	-1.6	-28.0	-0.6	-28.3	-1.4
335	-2.2	-28.3	-1.6	-28.2	-0.7	-28.3	-1.5
340	-2.2	-28.3	-1.6	-28.0	-0.7	-28.3	-1.5
345	-2.3	-28.3	-1.6	-28.0	-0.7	-28.3	-1.5
350	-2.4	-28.3	-1.7	-28.0	-0.7	-28.3	-1.6
355	-2.4	-28.3	-1.8	-28.3	-0.8	-28.3	-1.6
360	-2.6	-28.3	-1.8	-28.3	-0.8	-28.3	-1.7
365	-2.6	-28.5	-1.8	-28.2	-0.9	-28.5	-1.7
370	-2.6	-28.5	-1.7	-28.2	-0.9	-28.4	-1.7
375	-3.1	-28.5	-1.8	-28.2	-1.1	-28.5	-2.0
380	-3.3	-28.5	-1.9	-28.2	-1.2	-28.4	-2.1
385	-3.0	-28.5	-1.9	-28.3	-1.4	-28.3	-2.1

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

IPB University

Lampiran 23. Persentase simpangan hasil pendugaan numerik (ketebalan 1 cm)

Periode tempering

Suhu Pusat (°C)	Waktu pembekuan (menit)		Simpangan (%)
	Percobaan	Pendugaan	
-1.3	125	99.6	20.320
-1.6	130	111.9	13.923
-2.0	135	120.4	10.815
-2.5	140	126.3	9.786
-3.4	145	134.2	7.448
-4.8	150	142.4	5.067
-6.3	155	148.7	4.065
-8.1	160	154.6	3.375
-10.3	165	160.6	2.667
-12.7	170	166.5	2.059
-15.0	175	172.3	1.543
-16.8	180	177.1	1.611
-18.4	185	181.7	1.784
Rata-rata simpangan pendugaan =			6.497 %



Lampiran 24. Persentase simpangan hasil pendugaan numerik (ketebalan 2 cm)

Periode tempering Suhu Pusat ($^{\circ}\text{C}$)	Waktu Pembekuan (menit)		Simpangan (%)
	Percobaan	Pendugaan	
-1.2	190	190.2	0.105
-1.3	195	202.1	3.641
-1.3	200	202.1	1.050
-1.4	205	207.6	1.268
-1.5	210	213.0	1.429
-1.5	215	213.0	0.930
-1.7	220	218.6	0.636
-1.8	225	221.1	1.733
-2.0	230	225.1	2.130
-2.3	235	230.3	2.000
-2.7	240	236.4	1.500
-3.4	245	245.2	0.082
-4.2	250	253.0	1.200
-5.5	255	263.3	3.255
-6.8	260	271.8	4.538
-8.1	265	279.2	5.358
-9.1	270	284.4	5.333
-10.4	275	290.9	5.782
-11.6	280	296.7	5.964
-12.7	285	301.9	5.930
-13.8	290	307.2	5.931
-14.6	295	311.2	5.492
-15.4	300	315.2	5.067
-16.3	305	319.9	4.885
-17.2	310	324.9	4.806
-17.8	315	328.5	4.286
-18.5	320	332.6	3.938
Rata-rata simpangan pendugaan =			3.269 %

Lampiran 25. Persentase simpangan hasil pendugaan numerik (ketebalan 3 cm)

Periode tempering

Suhu Pusat (°C)	Waktu Pembekuan (menit)		Simpangan (%)
	Percobaan	Pendugaan	
-1.7	365	340.6	6.685
-1.7	370	340.6	7.946
-2.0	375	347.9	7.227
-2.1	380	350.1	7.868
-2.1	385	350.1	9.065
-2.0	390	347.9	10.795
-2.3	395	354.1	10.354
-3.0	400	366.5	8.375
-3.8	405	377.9	6.691
-4.5	410	386.3	5.780
-5.3	415	394.7	4.892
-6.1	420	402.2	4.238
-6.9	425	409.1	3.741
-7.5	430	414.1	3.698
-8.1	435	418.8	3.724
-8.9	440	425.0	3.409
-9.7	445	430.9	3.169
-10.3	450	435.3	3.267
-11.1	455	441.0	3.077
-11.8	460	449.8	2.217
-12.6	465	451.8	2.839
-13.4	470	457.6	2.638
-14.0	475	462.1	2.716
-14.6	480	466.6	2.792
-15.3	485	472.0	2.680
-15.7	490	475.1	3.041
-16.4	495	480.8	2.869
-17.0	500	485.9	2.820
-17.5	505	490.2	2.931
-17.9	510	493.9	3.157

Rata-rata simpangan pendugaan = 4.823 %