PREDIKSI DAN KLASIFIKASI RESPON FISIOLOGIS SAPI PERAH LAKTASI MENGGUNAKAN *ARTIFICIAL NEURAL NETWORK* PADA DATARAN TINGGI DI BPPIBTSP BUNIKASIH, CIANJUR

SULTHAN FALAH SAMIH

ILMU PRODUKSI DAN TEKNOLOGI PETERNAKAN
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

IPB University
Bogor Indonesia

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.

Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia

PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul "Prediksi dan Klasifikasi Respon Fisiologis Sapi Perah Laktasi Menggunakan *Artificial Neural Network* pada Dataran Tinggi di BPPIBTSP Bunikasih, Cianjur" adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir tesis ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Agustus 2026

Sulthan Falah Samih
D1501251044

@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.
Perpustakaan IPB University

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

IPB University
Bogor Indonesia

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.

Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

RINGKASAN

SULTHAN FALAH SAMIH. Prediksi dan Klasifikasi Respon Fisiologis Sapi Perah Laktasi Menggunakan *Artificial Neural Network* pada Dataran Tinggi di BPPIBTSP Bunikasih, Cianjur. Dibimbing oleh AHMAD YANI, IYEP KOMALA dan CHUSNUL ARIF.

Produktivitas sapi perah dipengaruhi oleh kemampuan ternak mempertahankan keseimbangan fisiologis terhadap perubahan mikroklimat. Suhu udara (Ta) dan kelembapan relatif (RH) memengaruhi mekanisme termoregulasi yang tercermin melalui denyut jantung (HR) dan frekuensi napas (RR). Penilaian kondisi termal umumnya menggunakan *Temperature–Humidity Index* (THI), tetapi pendekatan tersebut hanya merepresentasikan kondisi lingkungan sehingga belum sepenuhnya menggambarkan res*pon* biologis ternak. Integrasi informasi mikroklimat dan res*pon* fisiologis diperlukan untuk menghasilkan penilaian kondisi termal yang lebih representatif.

Penelitian ini bertujuan memprediksi respon fisiologis sapi perah menggunakan *Artificial Neural Network* (ANN) berdasarkan Ta dan RH, mengklasifikasikan kondisi termal berdasarkan hasil prediksi fisiologis, serta mengevaluasi kesesuaiannya dengan klasifikasi berbasis THI. Penelitian dilakukan di BPPIBTSP Bunikasih, Kabupaten Cianjur, menggunakan 14 ekor sapi *Friesian Holstein* laktasi kedua. Data mikroklimat dan respon fisiologis disinkronkan berdasarkan waktu pengamatan untuk membangun model ANN dengan Ta dan RH sebagai variabel masukan serta HR dan RR sebagai variabel keluaran. Kinerja model dievaluasi menggunakan *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Squared Error* (RMSE), koefisien determinasi (R^2), dan tingkat kesesuaian.

Sebanyak 170 observasi berhasil dihimpun. Model ANN memprediksi HR dengan MAE 4,57, RMSE 5,85, dan R^2 0,51, sedangkan prediksi RR menghasilkan MAE 4,32, RMSE 5,23, dan R^2 0,69. RR menunjukkan akurasi prediksi yang lebih baik dan lebih sensitif terhadap perubahan mikroklimat dibandingkan HR. Klasifikasi kondisi termal berdasarkan hasil prediksi menunjukkan bahwa respon ternak berkembang melalui fase Respon Adaptif sebelum mencapai *Heat Stress*. Perbandingan dengan klasifikasi berbasis THI menghasilkan tingkat kesesuaian sebesar 85,29%, dengan ketidaksesuaian terutama terjadi antara kategori Respon Adaptif dan *Heat Stress*.

ANN mampu menghubungkan perubahan mikroklimat dengan respon fisiologis sehingga menghasilkan penilaian kondisi termal yang lebih mencerminkan kondisi biologis sapi perah. Pendekatan ini tidak menggantikan THI, tetapi melengkapinya sebagai dasar pengembangan sistem pemantauan kondisi termal yang lebih representatif untuk mendukung pengelolaan lingkungan kandang, peningkatan kesejahteraan ternak, dan penerapan *precision livestock farming* pada peternakan sapi perah.

Kata kunci: *artificial neural network*, kondisi termal, mikroklimat, respon fisiologis, sapi perah

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

SUMMARY

SULTHAN FALAH SAMIH. Prediction and Classification of Physiological Responses in Lactating Dairy Cattle Using Artificial Neural Network in the Highland Area at BPPIBTSP Bunikasih, Cianjur. Supervised by AHMAD YANI, IYEP KOMALA and CHUSNUL ARIF.

Dairy cattle productivity depends on the ability of animals to maintain physiological homeostasis under changing microclimatic conditions. Air temperature (Ta) and relative humidity (RH) influence thermoregulation, which is reflected in changes in heart rate (HR) and respiration rate (RR). Thermal conditions are commonly evaluated using the Temperature–Humidity Index (THI); however, this approach represents environmental conditions only and does not fully reflect the biological responses of individual animals. Therefore, integrating microclimatic variables with physiological responses is necessary to provide a more representative assessment of thermal conditions.

This study aimed to predict the physiological responses of dairy cattle using an Artificial Neural Network (ANN) based on Ta and RH, classify thermal conditions according to the predicted physiological responses, and evaluate their agreement with THI-based classification. The study was conducted at BPPIBTSP Bunikasih, Cianjur, using fourteen second-lactation Friesian Holstein dairy cows. Microclimatic and physiological data collected were synchronized according to observation time to develop an ANN model with Ta and RH as input variables and HR and RR as output variables. Model performance was evaluated using Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Squared Error (RMSE), the coefficient of determination (R^2), and the Agreement Rate.

A total of 170 observations were included in the final dataset. The ANN predicted HR with an MAE of 4.57, an RMSE of 5.85, and an R^2 of 0.51, whereas RR prediction achieved an MAE of 4.32, an RMSE of 5.23, and an R^2 of 0.69. RR showed higher prediction accuracy and greater sensitivity to microclimatic variation than HR. Physiological classification demonstrated that thermal responses developed progressively through an Adaptive Response stage before reaching Heat Stress. Comparison with THI-based classification produced an Agreement Rate of 85.29%, with most disagreements occurring between the Adaptive Response and Heat Stress categories.

The ANN successfully linked microclimatic variation with physiological responses, providing a thermal assessment that more closely reflected the biological condition of dairy cattle. This approach does not replace THI but complements it, providing a basis for developing more representative thermal monitoring systems to support barn environmental management, improve dairy cattle welfare, and advance precision livestock farming.

Keywords: artificial neural network, dairy cattle, microclimate, physiological responses, thermal condition.

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

IPB University
Bogor Indonesia

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.

Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
Perpustakaan IPB University

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

PREDIKSI DAN KLASIFIKASI RESPON FISIOLOGIS SAPI PERAH LAKTASI MENGGUNAKAN *ARTIFICIAL NEURAL NETWORK* PADA DATARAN TINGGI DI BPPIBTSP BUNIKASIH, CIANJUR

SULTHAN FALAH SAMIH

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister pada
Program Studi Ilmu Produksi dan Teknologi Peternakan

ILMU PRODUKSI DAN TEKNOLOGI PETERNAKAN
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
Perpustakaan IPB University

Tim Penguji pada Ujian Tesis:
Dr. Ir. Afton Atabany M.Si.

Judul Tesis : Prediksi dan Klasifikasi Respon Fisiologis Sapi Perah Laktasi Menggunakan *Artificial Neural Network* pada Dataran Tinggi di BPPIBTSP Bunikasih, Cianjur

Nama : Sulthan Falah Samih

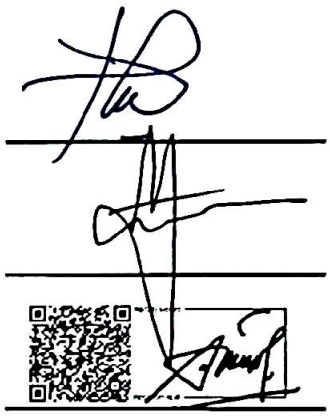
NIM : D1501251044

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Dr. Ahmad Yani, S.TP., M.Si.

Pembimbing 2:
Dr. Iyep Komala, S.Pt., M.Si.

Pembimbing 3:
Prof. Dr. Chusnul Arif, S.TP., M.Si.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Ir. Cece Sumantri, M.Sc.
NIP 19591212 198603 1 004

Dekan Fakultas Peternakan:
Prof. Dr. Ir. Idat Galih Permana, MSc.Agr.
NIP 19670506 199103 1 001



Tanggal Ujian: 29 Juli 2026

Tanggal Lulus:

IPB University
Bogor Indonesia
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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

IPB University
Bogor Indonesia

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.

Perpustakaan IPB University

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Desember 2025 sampai bulan Januari 2026 ini ialah prediksi respon fisiologis dan penilaian kondisi termal sapi perah berbasis kecerdasan buatan, dengan judul "Prediksi dan Klasifikasi Respon Fisiologis Sapi Perah Laktasi Menggunakan *Artificial Neural Network* pada Dataran Tinggi di BPPIBTSP Bunikasih, Cianjur".

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing, Dr. Ahmad Yani, S.TP., M.Si., Dr. Iyep Komala, S.Pt., M.Si., dan Prof. Dr. Chusnul Arif, S.TP., M.Si. yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada moderator sidang Dr. Ir. Sigid Prabowo, S.Pt., M.Sc. dan penguji luar komisi pembimbing Dr. Ir. Afton Atabany M.Si. Di samping itu, penghargaan penulis sampaikan kepada BPPIBTSP Bunikasih Cianjur yang telah memberi izin penelitian, rekan tim penelitian Maura dan Sabila yang telah membantu selama pengumpulan data, grup JukJerus, grup Perah dan Sinergi 58 yang telah membantu selama perkuliahan. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada ayah, ibu, kakak, Farha dan serta seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayangnya.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Agustus 2026

Sulthan Falah Samih

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

IPB University
Bogor Indonesia

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.

Perpustakaan IPB University

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL xi

DAFTAR GAMBAR xi

DAFTAR LAMPIRAN xi

I PENDAHULUAN 1
- 1.1 Latar Belakang 1
- 1.2 Rumusan Masalah 3
- 1.3 Tujuan 3
- 1.4 Manfaat 3
- 1.5 Ruang Lingkup 3

II METODE 4
- 2.1 Waktu dan Tempat Penelitian 4
- 2.2 Alat dan Bahan 4
- 2.3 Prosedur Kerja 4
  - 2.3.1 Pengumpulan Data 5
  - 2.3.2 Pengolahan Data 6
  - 2.3.3 Pengembangan Model *Artificial Neural Network* 6
  - 2.3.4 Interpretasi Kondisi Termal 7
- 2.4 Analisis data 8
  - 2.4.1 Analisis Statistik 8
  - 2.4.2 Uji Normalitas, Analisis Korelasi, dan Analisis Regresi 8
  - 2.4.3 Perhitungan *Temperature–Humidity Index* 9
  - 2.4.4 Pengembangan Model *Artificial Neural Network* 10
  - 2.4.5 Evaluasi Model dan Interpretasi Kondisi Termal 11

III HASIL DAN PEMBAHASAN 13
- 3.1 Kondisi Umum Lokasi Penelitian 13
- 3.2 Karakteristik Mikroklimat dan Respon Fisiologis Sapi Perah 14
- 3.3 Prediksi Respon Fisiologis Sapi Perah Menggunakan *Artificial Neural Network* 17
- 3.4 Interpretasi Kondisi Termal Berdasarkan Respon Fisiologis 20
- 3.5 Perbandingan Penilaian Kondisi Termal Berdasarkan Respon Fisiologis dan *Temperature Humidity Indeks* 24

IV SIMPULAN DAN SARAN 28
- 4.1 Simpulan 28
- 4.2 Saran 28

DAFTAR PUSTAKA 29

LAMPIRAN 34

RIWAYAT HIDUP 45

IPB University Bogor Indonesia

@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.

IPB University

Perpustakaan IPB University

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

IPB University
Bogor Indonesia

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.

Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

DAFTAR TABEL

1	Statistik deskriptif karakteristik mikroklimat dan respon fisiologis	14
2	Hasil analisis hubungan antara karakteristik mikroklimat dan respon fisiologis sapi perah	15
3	Performa model *Artificial Neural Network*	17
4	Kriteria klasifikasi kondisi termal berbasis fisiologis	21
5	Matriks konfusi dan tingkat kesesuaian klasifikasi fisiologis dan *Temperature Humidity Index*	26

DAFTAR GAMBAR

1	Alur dalam tahapan penelitian	5
2	Proses kerja D-Ruminansia	5
3	Arsitektur model *Artificial Neural Network*	7
4	Peta lokasi penelitian di BPPIBTSP Bunikasih, Cianjur	13
5	Hubungan antara oservasi dan prediksi *Artificial Neural Network*	19
6	Komparasi nilai observasi dan prediksi *Artificial Neural Network*	20
7	*Response surface* hasil prediksi *Artificial Neural Network* terhadap denyut jantung pada berbagai kombinasi suhu udara dan kelembapan relative	23
8	*Response surface* hasil prediksi *Artificial Neural Network* terhadap respirasi pada berbagai kombinasi suhu udara dan kelembapan relatif	24
9	Distribusi spasial *Temperature Humidity Index* pada berbagai kombinasi suhu udara dan kelembapan relatif	25

DAFTAR LAMPIRAN

1	Kode Pembuatan Model *Artificial Neural Network*	35
2	Kondisi kandang pemeliharaan dan pemerahan BPPIBTSP Bunikasih, Cianjur	42
3	Pemasangan alat D-Ruminansia	43
4	Proses pengambilan data respon fisiologis	44

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

IPB University
Bogor Indonesia

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.

Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sapi perah merupakan salah satu komoditas strategis dalam subsektor peternakan yang berperan sebagai penyedia susu untuk memenuhi kebutuhan protein hewani masyarakat. Permintaan susu di Indonesia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk, peningkatan pendapatan, urbanisasi, dan perubahan pola konsumsi. Peningkatan kebutuhan tersebut belum dapat diimbangi oleh produksi susu dalam negeri sehingga sebagian besar pasokan masih dipenuhi melalui impor. Data Badan Pusat Statistik menunjukkan bahwa populasi sapi perah Indonesia meningkat dari 485.809 ekor pada tahun 2024 menjadi 499.360 ekor pada tahun 2025 (BPS 2025). Peningkatan populasi belum diikuti oleh peningkatan produksi yang mampu memenuhi kebutuhan nasional sehingga produktivitas sapi perah masih menjadi perhatian dalam pengembangan industri persusuan Indonesia.

Produktivitas sapi perah dipengaruhi oleh interaksi faktor genetik, nutrisi, kesehatan, manajemen pemeliharaan, dan lingkungan. Perbaikan genetik, formulasi pakan, serta manajemen pemeliharaan dapat dirancang melalui berbagai intervensi teknis. Lingkungan memiliki karakter yang berbeda karena berubah secara terus-menerus mengikuti waktu, cuaca, dan kondisi kandang. Perubahan lingkungan memengaruhi konsumsi pakan, efisiensi penggunaan nutrien, produksi susu, dan performa reproduksi sapi perah (West 2003). Peningkatan beban panas mengubah prioritas penggunaan energi dari produksi menuju pemeliharaan homeostasis sehingga efisiensi biologis ternak menurun (Baumgard dan Rhoads 2012). Kondisi tersebut diikuti oleh perubahan respon fisiologis yang memengaruhi kesehatan dan kesejahteraan sapi perah (Becker *et al.* 2020). Hasil berbagai penelitian tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan mempertahankan produktivitas sangat dipengaruhi oleh kemampuan ternak beradaptasi terhadap perubahan lingkungan.

Lingkungan yang secara langsung diterima ternak direpresentasikan oleh mikroklimat kandang. Suhu udara dan kelembapan relatif merupakan dua komponen utama yang menentukan besarnya beban panas yang diterima tubuh sapi. Variasi kedua parameter tersebut memengaruhi mekanisme pertukaran panas antara tubuh ternak dan lingkungan sehingga berkontribusi terhadap perubahan kondisi fisiologis serta performa ternak (Collier dan Gebremedhin 2015). Pada sistem peternakan sapi perah di wilayah tropis, dinamika mikroklimat kandang menjadi faktor penting yang perlu dipantau karena perubahan suhu udara dan kelembapan relatif dapat berlangsung secara cepat sesuai kondisi cuaca dan lingkungan pemeliharaan (Asmarasari *et al.* 2023).

Perubahan mikroklimat menjadi perhatian penting pada peternakan sapi perah di wilayah tropis. Bangsa *Friesian Holstein* berasal dari daerah beriklim sedang sehingga memiliki kemampuan adaptasi yang lebih terbatas terhadap suhu udara dan kelembapan relatif yang tinggi (Kadzere *et al.* 2002). Kondisi tersebut mendorong berkembangnya peternakan sapi perah di wilayah dataran tinggi yang memiliki suhu lingkungan lebih rendah. Karakteristik iklim wilayah belum selalu menggambarkan kondisi termal yang benar-benar diterima ternak karena mikroklimat kandang tetap berubah mengikuti kondisi lingkungan dan manajemen pemeliharaan. Penelitian pada peternakan sapi perah di Indonesia menunjukkan bahwa tekanan panas tetap dapat terjadi meskipun lokasi pemeliharaan berada pada wilayah dengan kondisi lingkungan yang relatif lebih sejuk apabila kondisi

mikroklimat kandang tidak mendukung pelepasan panas tubuh secara efektif (Leondro *et al.* 2021). Evaluasi kondisi termal perlu dilakukan berdasarkan mikroklimat yang dialami ternak selama pemeliharaan sehingga tingkat tekanan panas dapat dinilai secara lebih akurat.

Temperature–Humidity Index (THI) merupakan indeks yang dikembangkan untuk menggambarkan tingkat tekanan panas berdasarkan kombinasi suhu udara dan kelembapan relatif (Kibler 1964). Nilai THI yang semakin tinggi umumnya diikuti oleh peningkatan risiko *heat stress* serta penurunan performa produksi sapi perah (Bohmanova *et al.* 2007). Klasifikasi tingkat kenyamanan termal berdasarkan THI telah banyak diterapkan sebagai dasar evaluasi kondisi lingkungan pada peternakan sapi perah tropis (Moran 2005). Meskipun demikian, THI hanya menggambarkan kondisi lingkungan dan belum sepenuhnya merepresentasikan variasi respon biologis setiap individu ternak (Dikmen dan Hansen 2009).

Penilaian THI merepresentasikan kondisi lingkungan, sedangkan respon setiap individu sapi dipengaruhi oleh kemampuan adaptasi yang berbeda. Yan *et al.* (2021) menunjukkan bahwa perubahan parameter fisiologis tidak selalu terjadi pada nilai THI yang sama karena setiap individu memiliki ambang respon yang berbeda terhadap peningkatan beban panas. Galán *et al.* (2018) menjelaskan bahwa indikator berbasis respon fisiologis mampu menangkap variasi biologis antarindividu yang tidak dapat direpresentasikan sepenuhnya oleh indikator berbasis lingkungan. Penilaian kondisi termal memerlukan informasi mengenai tekanan panas lingkungan sekaligus respon biologis yang muncul pada ternak.

Respon fisiologis menjadi indikator yang secara langsung menggambarkan proses adaptasi tubuh terhadap perubahan mikroklimat. Frekuensi napas merupakan salah satu indikator fisiologis yang paling cepat berubah sebagai respon terhadap peningkatan beban panas (Idris *et al.* 2021). Peningkatan frekuensi napas berperan meningkatkan pelepasan panas melalui mekanisme evaporasi (Ruban *et al.* 2020). Penyesuaian denyut jantung mencerminkan perubahan sistem kardiovaskular dalam mempertahankan distribusi panas menuju permukaan tubuh (Kovács *et al.* 2014). Kombinasi kedua parameter memberikan informasi yang lebih lengkap mengenai kemampuan sapi mempertahankan keseimbangan panas.

Perkembangan teknologi sensor memungkinkan suhu udara, kelembapan relatif, dan respon fisiologis direkam secara berkelanjutan sehingga hubungan antarvariabel dapat dipelajari dengan lebih baik. Data yang dihasilkan memiliki karakter dinamis dan dipengaruhi oleh interaksi berbagai faktor biologis maupun lingkungan. Hubungan seperti ini sulit dijelaskan hanya menggunakan pendekatan linier. Rebez *et al.* (2024) menjelaskan bahwa *Artificial Neural Network* (ANN) mampu mempelajari hubungan nonlinier dari data biologis dan lingkungan tanpa harus menetapkan bentuk persamaan sejak awal. Penerapan ANN pada sapi perah juga telah digunakan untuk memprediksi respon fisiologis berdasarkan variabel lingkungan dengan tingkat akurasi yang baik (Shu *et al.* 2023). Dalam penelitian ini, ANN diposisikan sebagai alat untuk memodelkan hubungan antara suhu udara, kelembapan relatif, denyut jantung, dan frekuensi napas, bukan sebagai tujuan penelitian.

Pada penelitian terdahulu memanfaatkan ANN untuk meningkatkan akurasi prediksi parameter fisiologis atau parameter lingkungan (Rebez *et al.* 2024). Pemanfaatan hasil prediksi sebagai dasar penilaian kondisi termal masih terbatas. Sebagian besar penelitian masih berfokus pada peningkatan performa prediksi

IPB University Bogor Indonesia
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.
Perpustakaan IPB University

model, sementara pemanfaatan hasil prediksi tersebut untuk mendukung interpretasi biologis kondisi termal ternak belum banyak dikembangkan. Penelitian ini mengembangkan model ANN untuk memprediksi denyut jantung dan frekuensi napas berdasarkan suhu udara dan kelembapan relatif, kemudian menginterpretasikan hasil prediksi menjadi kategori Nyaman, Respon Adaptif, dan *Heat Stress*. Klasifikasi tersebut dibandingkan dengan THI untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua metode dalam menggambarkan kondisi termal sapi perah pada lingkungan tropis dataran tinggi. Hasil penelitian diharapkan dapat melengkapi penilaian kondisi termal berbasis lingkungan melalui pemanfaatan respon fisiologis sebagai representasi kondisi biologis ternak.

1.2 Rumusan Masalah

Penilaian kondisi termal sapi perah masih didominasi oleh pendekatan berbasis THI yang menggambarkan tingkat tekanan panas lingkungan, tetapi belum sepenuhnya merepresentasikan respon biologis setiap individu ternak. Hubungan antara suhu udara, kelembapan relatif, dan respon fisiologis juga bersifat kompleks sehingga diperlukan pendekatan yang mampu mengintegrasikan informasi mikroklimat dengan respon fisiologis untuk menghasilkan penilaian kondisi termal yang lebih representatif.

1.3 Tujuan

Penelitian ini bertujuan mengembangkan pendekatan penilaian kondisi termal sapi perah berbasis respon fisiologis melalui pemodelan ANN. Pendekatan tersebut dikembangkan dengan memprediksi denyut jantung dan frekuensi napas berdasarkan suhu udara dan kelembapan relatif. Hasil prediksi kemudian diinterpretasikan ke dalam kategori kondisi termal dan dievaluasi tingkat kesesuaiannya dengan klasifikasi berbasis THI.

1.4 Manfaat

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu produksi dan teknologi peternakan melalui pengembangan pendekatan penilaian kondisi termal yang mengintegrasikan informasi mikroklimat dan respon fisiologis. Hasil penelitian juga diharapkan menjadi dasar pengembangan sistem pemantauan kondisi termal yang lebih objektif serta mendukung pengelolaan lingkungan kandang untuk meningkatkan produktivitas, kesehatan, dan kesejahteraan sapi perah.

1.5 Ruang Lingkup

Penelitian ini dilaksanakan pada sapi perah *Friesian Holstein* laktasi kedua yang dipelihara di BPPIBTSP Bunikasih, Kabupaten Cianjur, Jawa Barat. Variabel mikroklimat yang diamati meliputi suhu udara dan kelembapan relatif, sedangkan respon fisiologis yang diamati meliputi denyut jantung dan frekuensi napas. Analisis difokuskan pada pengembangan model ANN untuk memprediksi respon fisiologis berdasarkan kondisi mikroklimat, menginterpretasikan hasil prediksi menjadi kategori kondisi termal, serta membandingkannya dengan klasifikasi berbasis THI. Penelitian ini tidak membahas pengaruh faktor genetik, nutrisi, kesehatan, reproduksi, produksi susu, maupun manajemen pemeliharaan terhadap kondisi termal sapi perah.

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

II METODE

2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada Desember 2025 hingga Januari 2026 di Balai Pengembangan Produksi dan Inovasi Bibit Ternak Sapi Perah (BPPIBTSP) Bunikasih, Kabupaten Cianjur, Jawa Barat. Lokasi penelitian berada pada wilayah dataran tinggi dengan ketinggian sekitar 1.100 m di atas permukaan laut. Secara umum, wilayah ini memiliki suhu udara berkisar 18–26 °C dan kelembapan relatif 70–90%, sehingga menjadi salah satu sentra pengembangan sapi perah di Jawa Barat. Pengambilan data dilakukan pada saat pemerahan pagi pukul 05.00–07.00 WIB dan pemerahan sore pukul 15.00–17.00 WIB untuk menyesuaikan dengan jadwal pemerahan di lokasi penelitian.

2.2 Alat dan Bahan

Penelitian menggunakan 14 ekor sapi perah *Friesian Holstein* laktasi kedua yang dipelihara di Balai Pengembangan Produksi dan Inovasi Bibit Ternak Sapi Perah (BPPIBTSP) Bunikasih, Kabupaten Cianjur, Jawa Barat. Seluruh ternak berada dalam kondisi sehat secara klinis, memiliki fase laktasi yang relatif seragam, serta dipelihara dengan sistem manajemen yang sama selama penelitian untuk meminimalkan variasi yang berasal dari faktor di luar kondisi mikroklimat.

Peralatan penelitian meliputi perangkat D-Ruminansia berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk memantau suhu udara (Ta) dan kelembapan relatif (RH), stetoskop untuk mengukur denyut jantung (HR), *stopwatch* untuk mengukur frekuensi napas (RR), serta komputer untuk pengolahan dan analisis data. Pengembangan model dan analisis data dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python pada lingkungan Google Colaboratory.

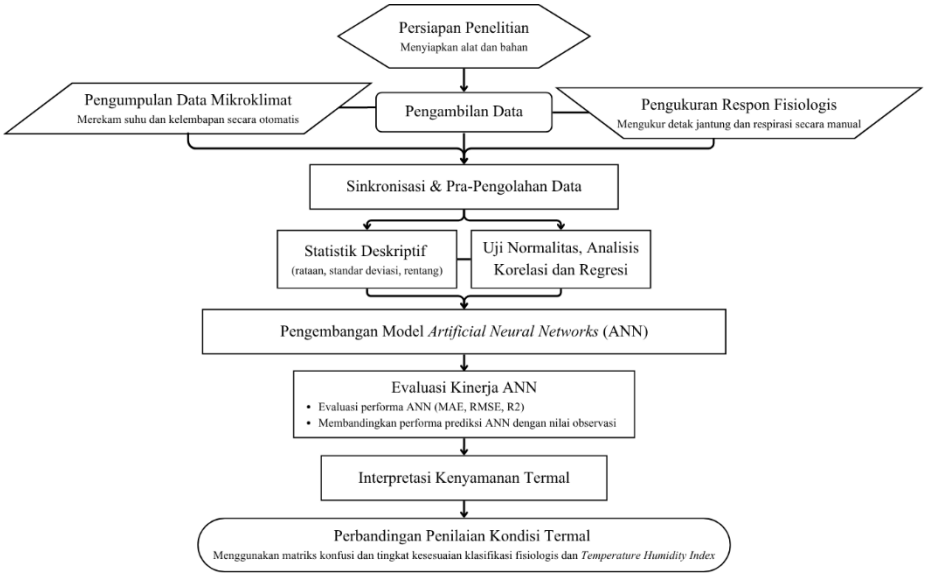
2.3 Prosedur Kerja

Penelitian dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang meliputi pengumpulan data, pengolahan data, pengembangan model ANN, interpretasi kondisi termal, dan evaluasi hasil. Data yang digunakan terdiri atas data mikroklimat berupa suhu udara (Ta) dan kelembapan relatif (RH), serta data respon fisiologis berupa denyut jantung (HR) dan frekuensi napas (RR).

Tahap pengumpulan data bertujuan memperoleh informasi mikroklimat dan respon fisiologis yang saling bersesuaian berdasarkan waktu pengamatan. Data yang telah diperoleh selanjutnya melalui proses pengolahan yang mencakup sinkronisasi data, pemeriksaan kualitas data, analisis statistik, serta persiapan dataset untuk pengembangan model ANN. Dataset yang telah memenuhi kriteria selanjutnya digunakan sebagai masukan untuk membangun model prediksi denyut jantung dan frekuensi napas berdasarkan suhu udara dan kelembapan relatif.

Hasil prediksi model kemudian diinterpretasikan ke dalam kategori kondisi termal berdasarkan respon fisiologis sapi perah. Tahap akhir penelitian dilakukan melalui evaluasi performa model menggunakan parameter statistik yang sesuai serta membandingkan hasil interpretasi kondisi termal berbasis respon fisiologis dengan klasifikasi berdasarkan THI. Rangkaian tahapan tersebut disusun untuk menghasilkan pendekatan penilaian kondisi termal yang menghubungkan kondisi mikroklimat dengan respon biologis ternak secara sistematis. Alur penelitian secara lengkap disajikan pada Gambar 1.

IPB University Bogor Indonesia
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.
Perpustakaan IPB University



Gambar 1 Alur dalam tahapan penelitian

2.3.1 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan pada 14 ekor sapi perah *Friesian Holstein* laktasi kedua yang dipelihara di Balai Pengembangan Produksi dan Inovasi Bibit Ternak Sapi Perah (BPPIBTSP) Bunikasih, Kabupaten Cianjur, Jawa Barat. Seluruh ternak dipelihara dengan sistem manajemen yang sama selama penelitian untuk meminimalkan pengaruh faktor di luar kondisi mikroklimat.

Data mikroklimat meliputi suhu udara (Ta) dan kelembapan relatif (RH) yang direkam menggunakan perangkat D-Ruminansia berbasis IoT. Perangkat dipasang di dalam kandang dan merekam data secara kontinu selama periode penelitian. Data hasil pengukuran disimpan secara otomatis sebagai basis data mikroklimat. Mekanisme kerja sistem D-Ruminansia disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2 Proses kerja D-Ruminansia

Data respon fisiologis meliputi denyut jantung (HR) dan frekuensi napas (RR). Pengukuran HR dilakukan menggunakan stetoskop dengan menghitung jumlah denyut jantung per menit (denyut mnt^{-1}), sedangkan RR diukur melalui

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

pengamatan gerakan flank menggunakan *stopwatch* dan dinyatakan sebagai jumlah respirasi per menit (napas mnt^{-1}). Pengukuran fisiologis dilakukan pada saat pemerahan pagi dan sore bersamaan dengan pengamatan mikroklimat sehingga setiap pengamatan merepresentasikan kondisi lingkungan dan respon fisiologis pada waktu yang sama.

2.3.2 Pengolahan Data

Data mikroklimat dan data respon fisiologis diolah menggunakan bahasa pemrograman Python pada lingkungan Google Colaboratory. Kedua dataset disimpan dalam format *comma-separated values* (CSV) kemudian diintegrasikan berdasarkan *timestamp* pengamatan menggunakan metode *nearest-neighbor matching* melalui fungsi *merge_asof()* dengan toleransi sinkronisasi maksimum 10 menit. Pasangan data yang melebihi batas toleransi tidak disertakan dalam analisis sehingga setiap data respon fisiologis dipasangkan dengan kondisi mikroklimat yang memiliki waktu pengamatan paling mendekati.

Dataset hasil sinkronisasi menjalani proses data cleaning untuk memastikan konsistensi dan kelengkapan data sebelum dianalisis lebih lanjut. Analisis statistik deskriptif dilakukan untuk menggambarkan karakteristik suhu udara (Ta), kelembapan relatif (RH), denyut jantung (HR), dan frekuensi napas (RR). Nilai THI kemudian dihitung berdasarkan data Ta dan RH sebagai indikator kondisi termal lingkungan.

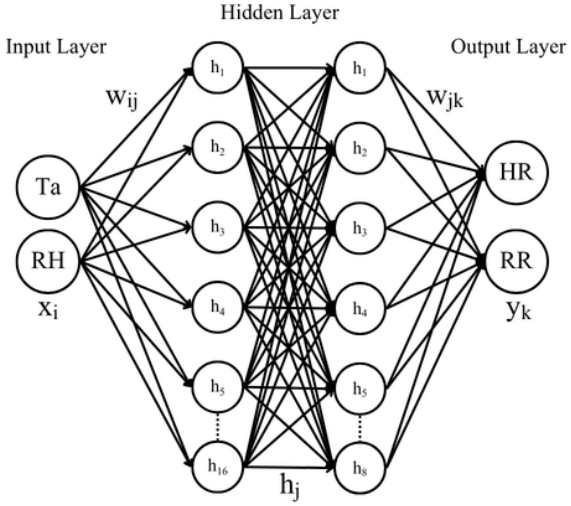
Variabel masukan dinormalisasi menggunakan metode *Min–Max normalization* sebelum proses pelatihan model. Dataset selanjutnya dibagi menjadi data latih (*training set*) dan data uji (*testing set*) dengan perbandingan 80:20 menggunakan *range-constrained train-test split*. Pendekatan ini mempertahankan rentang nilai data uji berada di dalam rentang data latih sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya ekstrapolasi selama proses pemodelan. Dataset yang telah melalui seluruh tahapan pengolahan digunakan sebagai masukan pada pengembangan model ANN.

2.3.3 Pengembangan Model *Artificial Neural Network*

Model ANN dikembangkan untuk memprediksi respon fisiologis sapi perah berdasarkan kondisi mikroklimat kandang. Variabel masukan terdiri atas suhu udara (Ta) dan kelembapan relatif (RH), sedangkan variabel keluaran berupa denyut jantung (HR) dan frekuensi napas (RR). Hubungan antara variabel mikroklimat dan respon fisiologis dipelajari secara langsung oleh model melalui proses pelatihan menggunakan data hasil pengamatan sehingga model mampu membentuk pola prediksi berdasarkan hubungan yang terdapat pada dataset penelitian.

Arsitektur model menggunakan *Multilayer Perceptron* (MLP) yang terdiri atas dua neuron pada lapisan masukan, dua lapisan tersembunyi dengan 16 dan 8 neuron, serta dua neuron pada lapisan keluaran. Arsitektur tersebut dipilih untuk mempelajari hubungan nonlinier antara suhu udara dan kelembapan relatif terhadap perubahan denyut jantung dan frekuensi napas. Lapisan tersembunyi berperan dalam mengekstraksi pola hubungan antarvariabel, sedangkan lapisan keluaran menghasilkan nilai prediksi masing-masing parameter fisiologis. Arsitektur model disajikan pada Gambar 3.

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University



Gambar 3 Arsitektur model *Artificial Neural Network*

Keterangan:
x_i = variabel masukan pada node ke-i di lapisan *input*
h_j = keluaran node ke-j pada lapisan tersembunyi
y_k = keluaran node ke-k pada lapisan *output* (nilai prediksi)
w_{ij} = bobot penghubung antara node *input* ke-i dan node tersembunyi ke-j
w_{jk} = bobot penghubung antara node tersembunyi ke-j dan node *output* ke-k

Lapisan tersembunyi menggunakan fungsi aktivasi *Rectified Linear Unit* (ReLU), sedangkan lapisan keluaran menggunakan fungsi aktivasi linear untuk menghasilkan nilai prediksi HR dan RR. Proses pelatihan dilakukan menggunakan optimizer Adam dengan fungsi *loss Mean Squared Error* (MSE). Teknik *early stopping* diterapkan berdasarkan nilai *validation loss* untuk menghentikan proses pelatihan apabila tidak terjadi peningkatan kinerja model dalam sejumlah iterasi tertentu. Model dengan kinerja terbaik digunakan untuk menghasilkan prediksi HR dan RR pada data uji.

2.3.4 Interpretasi Kondisi Termal

Nilai HR dan RR hasil prediksi model ANN digunakan sebagai dasar interpretasi kondisi termal sapi perah. Setiap pengamatan diklasifikasikan ke dalam tiga kategori, yaitu Nyaman, Respon Adaptif, dan *Heat Stress*, berdasarkan kriteria fisiologis yang ditetapkan pada penelitian ini. Klasifikasi berbasis respon fisiologis dibandingkan dengan klasifikasi berbasis THI untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian kedua pendekatan.

Tingkat kesesuaian dihitung menggunakan *Agreement Rate* sebagai ukuran proporsi pengamatan yang memiliki kategori kondisi termal yang sama. Tahap berikutnya adalah *grid prediction* dengan membangkitkan kombinasi nilai suhu udara (Ta) dan kelembapan relatif (RH) yang berada dalam rentang pengamatan penelitian. Setiap kombinasi digunakan sebagai masukan model ANN untuk menghasilkan prediksi HR dan RR, kemudian diinterpretasikan menjadi kategori kondisi termal. Hasil *grid prediction* digunakan untuk menggambarkan distribusi respon fisiologis dan kondisi termal pada berbagai kombinasi kondisi mikroklimat.

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

2.4 Analisis data

2.4.1 Analisis Statistik

Analisis statistik deskriptif dilakukan untuk menggambarkan karakteristik data mikroklimat dan respon fisiologis sebelum dilakukan pengembangan model ANN. Variabel yang dianalisis meliputi suhu udara (Ta), kelembapan relatif (RH), denyut jantung (HR), dan frekuensi napas (RR). Parameter statistik yang digunakan terdiri atas nilai rata-rata, simpangan baku, nilai minimum, dan nilai maksimum (Montgomery dan Runger 2018).

Rumus rata-rata:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{n}$$

Keterangan:
$\bar{x}$ = nilai rata-rata pengamatan
n = jumlah pengamatan
x_i = nilai pengamatan ke-i

Rumus simpangan baku:

$$S = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Keterangan:
S = simpangan baku
x_i = nilai pengamatan ke-i
$\bar{x}$ = nilai rata-rata pengamatan
n = jumlah pengamatan

Nilai minimum dan maksimum ditentukan berdasarkan nilai pengamatan terkecil dan terbesar pada masing-masing variabel. Hasil analisis statistik deskriptif digunakan untuk menggambarkan karakteristik data penelitian serta menjadi dasar evaluasi kualitas data sebelum proses normalisasi dan pengembangan model.

2.4.2 Uji Normalitas, Analisis Korelasi, dan Analisis Regresi

Uji normalitas dilakukan untuk mengevaluasi distribusi data sebelum analisis hubungan antarvariabel. Pengujian ini bertujuan menentukan apakah data memenuhi asumsi distribusi normal sehingga metode analisis yang digunakan sesuai dengan karakteristik data. Uji normalitas dilakukan menggunakan D'Agostino–Pearson *omnibus normality test*, yang mengevaluasi distribusi data berdasarkan kombinasi nilai *skewness* dan kurtosis (D'Agostino *et al.* 1990).

Analisis korelasi dilakukan untuk mengidentifikasi arah dan kekuatan hubungan antara variabel mikroklimat, yaitu suhu udara (Ta) dan kelembapan relatif (RH), terhadap respon fisiologis berupa denyut jantung (HR) dan frekuensi napas (RR). Pemilihan metode korelasi didasarkan pada hasil uji normalitas. Apabila kedua variabel yang dianalisis berdistribusi normal digunakan korelasi Pearson, sedangkan apabila salah satu atau kedua variabel tidak berdistribusi normal digunakan korelasi *Spearman* (Mukaka 2012). Nilai koefisien korelasi berada pada rentang −1 hingga +1, di mana nilai positif menunjukkan hubungan searah, nilai negatif menunjukkan hubungan

IPB University Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

berlawanan arah, dan nilai yang semakin mendekati ±1 menunjukkan hubungan yang semakin kuat.

Koefisien korelasi Pearson dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2}}$$

Keterangan:
r = koefisien korelasi Pearson
x_i = nilai variabel x pada pengamatan ke-i
y_i = nilai variabel x pada pengamatan ke-i
$\bar{x}$ = rata-rata variabel x
$\bar{y}$ = rata-rata variabel x
n = jumlah pengamatan

Apabila data tidak memenuhi asumsi normalitas, koefisien korelasi dihitung menggunakan korelasi peringkat *Spearman* dengan persamaan berikut.

$$r_s = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Keterangan:
r_s = nilai rata-rata pengamatan
d_i = selisih peringkat pasangan data ke-i
n = jumlah pengamatan

Analisis regresi dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh suhu udara dan kelembapan relatif terhadap respon fisiologis sapi perah sebelum pengembangan model ANN. Model regresi yang digunakan adalah regresi linier berganda dengan metode *Ordinary Least Squares* (OLS) (Montgomery dan Runger 2018). Analisis ini digunakan untuk mengidentifikasi arah pengaruh masing-masing variabel bebas terhadap denyut jantung dan frekuensi napas serta mengevaluasi kontribusi kedua variabel mikroklimat dalam menjelaskan variasi respon fisiologis.

Model regresi dinyatakan sebagai berikut.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon$$

Keterangan:
Y = respon fisiologis (HR atau RR)
β_0 = intersep
β_1, β_2 = koefisien regresi
X_1 = suhu udara (Ta)
X_2 = kelembapan relatif (RH)
ε = galat (error)

2.4.3 Perhitungan *Temperature–Humidity Index*

Nilai THI dihitung untuk menggambarkan tingkat tekanan panas berdasarkan kombinasi suhu udara (Ta) dan kelembapan relatif (RH). Nilai THI digunakan sebagai pendekatan berbasis lingkungan dan menjadi pembanding terhadap interpretasi kondisi termal berbasis respon fisiologis hasil prediksi model ANN. Perhitungan THI menggunakan persamaan yang dikembangkan oleh Kibler (1964), yaitu:

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

$$THI = 1{,}8Ta - (1 - RH) \times (Ta - 14{,}3) + 32$$

Keterangan:
THI = *Temperature Humidity Index*
Ta = suhu udara (°C)
RH = kelembapan relatif (%)

Nilai THI yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi termal lingkungan. Klasifikasi dilakukan berdasarkan kategori yang dikemukakan oleh Moran (2005), yaitu nyaman (THI ≤72), stres ringan (THI 73–79), stres sedang (THI 80–89), dan stres berat (THI >89). Untuk memudahkan perbandingan dengan klasifikasi berbasis respon fisiologis, kategori stres ringan diinterpretasikan sebagai Respon Adaptif, sedangkan kategori stres sedang dan stres berat digabungkan menjadi *Heat Stress*. Hasil klasifikasi digunakan sebagai pembanding terhadap klasifikasi kondisi termal berbasis respon fisiologis pada tahap evaluasi tingkat kesesuaian kedua pendekatan.

2.4.4 Pengembangan Model *Artificial Neural Network*

Artificial Neural Network digunakan untuk memprediksi respon fisiologis sapi perah berupa denyut jantung (HR) dan frekuensi napas (RR) berdasarkan kondisi mikroklimat kandang yang direpresentasikan oleh suhu udara (Ta) dan kelembapan relatif (RH). Sebelum proses pelatihan dilakukan, variabel masukan dinormalisasi menggunakan metode *Min–Max normalization* untuk menyamakan rentang nilai antarvariabel sehingga proses pembelajaran berlangsung lebih stabil dan efisien (Han *et al.* 2012). Normalisasi Min–Maks dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

Keterangan:
x' = nilai hasil normalisasi
x = nilai pengamatan
x_{min} = nilai minimum variabel
x_{max} = nilai maksimum variabel

Normalisasi diterapkan pada variabel masukan, yaitu Ta dan RH, sedangkan variabel keluaran berupa HR dan RR menggunakan nilai asli hasil pengamatan. Data yang telah dinormalisasi selanjutnya digunakan sebagai masukan pada ANN. Arsitektur yang digunakan terdiri atas dua neuron pada lapisan masukan yang merepresentasikan Ta dan RH, dua lapisan tersembunyi yang masing-masing terdiri atas 16 dan 8 neuron, serta dua neuron pada lapisan keluaran yang menghasilkan prediksi HR dan RR. Lapisan tersembunyi menggunakan fungsi aktivasi *Rectified Linear Unit* (ReLU) yang dirumuskan sebagai berikut (Hinton dan Nair 2010):

$$f(x) = \max(0, x)$$

Keterangan:
$f(x)$ = keluaran fungsi aktivasi
x = nilai masukan neuron

IPB University Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

Lapisan keluaran menggunakan fungsi aktivasi linear yang dinyatakan sebagai berikut (Goodfellow *et al.* 2016):

$$f(x) = x$$

Keterangan:
$f(x)$ = nilai keluaran neuron
x = nilai masukan neuron

Proses pelatihan ANN dilakukan dengan meminimalkan nilai *Mean Squared Error* (MSE) sebagai fungsi *loss*. Nilai MSE dihitung menggunakan persamaan berikut (Bishop 2006).

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2$$

Keterangan:
MSE = *Mean Squared Error*
y_i = nilai aktual
$\hat{y}_i$ = nilai prediksi
n = jumlah pengamatan

Pembaruan bobot selama proses pelatihan dilakukan menggunakan *optimizer Adam* yang memanfaatkan estimasi momen pertama dan momen kedua gradien untuk meningkatkan efisiensi serta stabilitas proses optimasi (Kingma dan Ba 2017). Untuk mengurangi risiko *overfitting*, pelatihan menerapkan teknik *early stopping* yang menghentikan proses pembelajaran secara otomatis apabila tidak terjadi peningkatan nilai *validation loss* dalam sejumlah iterasi tertentu (Prechelt 2000). Arsitektur dengan kinerja terbaik selanjutnya digunakan untuk menghasilkan prediksi HR dan RR yang menjadi dasar evaluasi model dan interpretasi kondisi termal sapi perah.

2.4.5 Evaluasi Model dan Interpretasi Kondisi Termal

Kinerja model ANN dalam memprediksi denyut jantung (HR) dan frekuensi napas (RR) dievaluasi menggunakan nilai *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Squared Error* (RMSE), dan koefisien determinasi (R^2). Ketiga parameter tersebut digunakan untuk menilai tingkat kesalahan prediksi serta kemampuan model dalam menjelaskan variasi data aktual (Willmott dan Matsuura 2005; Montgomery *et al.* 2021). Penggunaan ketiga parameter secara bersamaan memberikan evaluasi yang lebih komprehensif karena MAE menggambarkan besarnya kesalahan prediksi rata-rata, RMSE memberikan penalti yang lebih besar terhadap kesalahan prediksi yang ekstrem, sedangkan R^2 menunjukkan kemampuan model dalam menjelaskan keragaman data observasi.Nilai MAE dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{\mathrm{n}}\sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{n}}|\mathrm{y_i} - \hat{y}_\mathrm{i}|$$

Keterangan:
MAE = *Mean Absolute Error*
y_i = nilai aktual
$\hat{y}_i$ = nilai prediksi
n = jumlah pengamatan

IPB University Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

Nilai RMSE dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Keterangan:
$RMSE$ = *Root Mean Squared Error*
y_i = nilai aktual
$\hat{y}_i$ = nilai prediksi
n = jumlah pengamatan

Koefisien determinasi (R^2) dihitung menggunakan persamaan berikut (Montgomery *et al.* 2021).

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{(y_i - \bar{y}_i)^2}\right]$$

Keterangan:
R^2 = koefisien determinasi
y_i = nilai aktual
$\hat{y}_i$ = nilai prediksi
$\bar{y}$ = rata-rata nilai aktual
n = jumlah pengamatan

Nilai HR dan RR hasil prediksi selanjutnya digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi termal sapi perah ke dalam kategori Nyaman, Respon Adaptif, dan *Heat Stress* berdasarkan kriteria fisiologis yang ditetapkan dalam penelitian ini. Pendekatan ini didasarkan pada asumsi bahwa perubahan denyut jantung dan frekuensi napas merupakan bentuk respon biologis ternak terhadap perubahan kondisi mikroklimat.

Kategori Nyaman ditetapkan apabila HR ≤80 denyut mnt^{-1} dan RR ≤45 napas mnt^{-1}. Kategori Respon Adaptif ditetapkan apabila HR 81–95 denyut mnt^{-1} dan RR 46–60 napas mnt^{-1}. Pengamatan dengan nilai HR >95 denyut mnt^{-1} atau RR >60 napas mnt^{-1} dikategorikan sebagai *Heat Stress*. Pengelompokan tersebut digunakan untuk mengubah hasil prediksi ANN yang berupa nilai kontinu menjadi kategori kondisi termal sehingga memudahkan interpretasi biologis serta memungkinkan perbandingan dengan klasifikasi berbasis indikator lingkungan.

$$Agreement\ Rate = \left(\frac{N_{sesuai}}{N_{total}}\right) \times 100\%$$

Keterangan:
$Agreement\ Rate$ = tingkat kesesuaian klasifikasi (%)
N_{sesuai} = jumlah pengamatan dengan klasifikasi yang sama
N_{total} = jumlah seluruh pengamatan

Nilai *Agreement Rate* digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian antara klasifikasi kondisi termal berbasis respon fisiologis hasil prediksi ANN dan klasifikasi kondisi termal berdasarkan nilai THI.

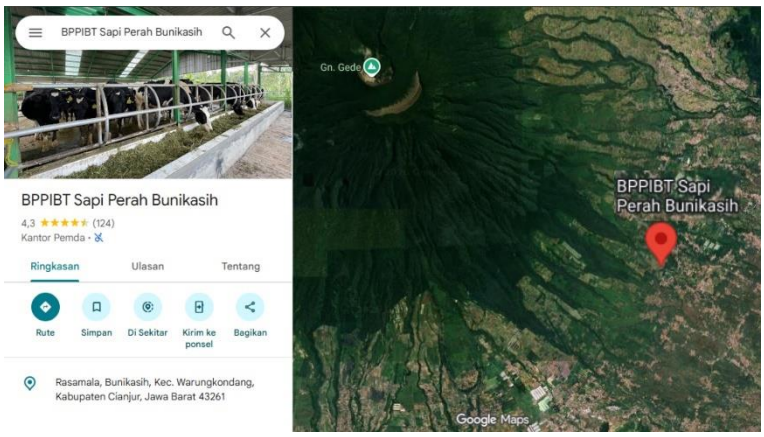
IPB University Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, 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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

III HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kondisi Umum Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Balai Pengembangan Produksi dan Inovasi Bibit Ternak Sapi Perah (BPPIBTSP) Bunikasih yang berlokasi di Kampung Padalengsar, Desa Bunikasih, Kecamatan Warungkondang, Kabupaten Cianjur, Provinsi Jawa Barat. BPPIBTSP Bunikasih merupakan Unit Pelaksana Teknis Daerah (UPTD) di bawah Dinas Ketahanan Pangan dan Peternakan Provinsi Jawa Barat yang menyelenggarakan kegiatan teknis di bidang pembibitan sapi perah, pengembangan inseminasi buatan, distribusi bibit, serta pelayanan teknis untuk mendukung pengembangan peternakan sapi perah di Jawa Barat (DKPP Jawa Barat 2024). Balai ini memiliki luas lahan sekitar 24,04 ha dan terletak pada koordinat 6°49'58,8" LS dan 107°03'01,9" BT. Lokasi penelitian berada pada wilayah dataran tinggi dengan ketinggian sekitar 1.100 m di atas permukaan laut, memiliki suhu lingkungan berkisar antara 18–26 °C dengan kelembapan relatif sekitar 85%, sehingga menyediakan kondisi yang sesuai untuk pengembangan sapi perah *Friesian Holstein* (Bahri *et al.* 2022). Peta lokasi penelitian disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4 Peta lokasi penelitian di BPPIBTSP Bunikasih, Cianjur

Sebagai pusat perbibitan sapi perah di Jawa Barat, BPPIBTSP Bunikasih berperan dalam penyediaan bibit unggul, pengembangan teknologi peternakan, serta pelayanan teknis bagi peternak sapi perah (DKPP Jawa Barat 2024). BPPIBTSP Bunikasih juga menjadi lokasi berbagai penelitian mengenai produksi susu, reproduksi, dan manajemen pemeliharaan sapi perah, sehingga mendukung pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang peternakan (A'ini *et al.* 2021). Penelitian ini dilakukan pada kelompok sapi perah *Friesian Holstein* laktasi yang dipelihara di BPPIBTSP Bunikasih dengan sistem manajemen pemeliharaan yang seragam. Penelitian terdahulu oleh Christi *et al.* (2020) mengevaluasi produksi susu sapi perah *Friesian Holstein* pada berbagai periode laktasi di lokasi yang sama, sedangkan Pariswara *et al.* (2021) mengkaji hubungan efisiensi reproduksi dengan produksi susu. Keberlanjutan pemanfaatan BPPIBTSP Bunikasih sebagai lokasi penelitian menunjukkan bahwa balai ini memiliki sistem pemeliharaan, pencatatan ternak, dan fasilitas yang mendukung pelaksanaan penelitian di bidang produksi dan teknologi peternakan.

3.2 Karakteristik Mikroklimat dan Respon Fisiologis Sapi Perah

Karakteristik mikroklimat dan respon fisiologis sapi perah selama penelitian disajikan pada Tabel 1. Sebanyak 170 observasi yang diperoleh selama periode pengamatan menunjukkan adanya variasi kondisi lingkungan dan respon biologis ternak. Variasi tersebut merepresentasikan dinamika mikroklimat yang terjadi selama penelitian dan menjadi dasar dalam analisis hubungan antara kondisi lingkungan dan respon fisiologis sapi perah.

Tabel 1 Statistik deskriptif karakteristik mikroklimat dan respon fisiologis

Variabel	Rataan ± SD	Min	Maks
Ta (°C)	23,01±4,32	18,2	32,2
RH (%)	79,98±12,34	50,3	94,3
HR (denyut mnt^{-1})	73,34±7,14	56	92
RR (napas mnt^{-1})	45,06±9,29	28	68

Keterangan: SD: standar devisasi; Min: minimal; Maks: maksimal; Ta: suhu udara; RH: kelembapan relatif; HR: denyut jantung; RR: frekuensi napas

Kondisi mikroklimat selama penelitian menunjukkan adanya perubahan suhu udara dan kelembapan relatif yang cukup besar selama periode pengamatan. Suhu udara memiliki nilai rataan 23,01±4,32 °C dengan kisaran 18,2–32,2 °C, sedangkan kelembapan relatif memiliki nilai rataan 79,98±12,34% dengan kisaran 50,3–94,3%. Rentang nilai tersebut menunjukkan bahwa kondisi lingkungan kandang mengalami dinamika harian dan tidak berada pada kondisi yang konstan. Variasi mikroklimat tersebut merupakan karakteristik umum wilayah tropis dataran tinggi yang dipengaruhi oleh perubahan kondisi cuaca dan waktu pengamatan.

Lokasi penelitian yang berada pada dataran tinggi secara umum memiliki kondisi lingkungan yang lebih sesuai untuk pemeliharaan sapi *Friesian Holstein* dibandingkan wilayah tropis dataran rendah. Fluktuasi suhu udara dan kelembapan relatif tetap terjadi sehingga dapat memengaruhi proses pertukaran panas antara tubuh ternak dan lingkungan. Suhu udara dan kelembapan relatif merupakan komponen mikroklimat utama yang menentukan keseimbangan panas tubuh karena keduanya memengaruhi jumlah panas yang diperoleh maupun dilepaskan oleh ternak. Perubahan kedua faktor tersebut dapat memengaruhi kemampuan sapi dalam mempertahankan kondisi fisiologis melalui mekanisme termoregulasi (Bernabucci *et al.* 2014; Collier *et al.* 2017).

Respon fisiologis sapi perah selama penelitian juga menunjukkan variasi antarperiode pengamatan. Denyut jantung memiliki nilai rataan 73,34±7,14 denyut mnt^{-1} dengan kisaran 56–92 denyut mnt^{-1}, sedangkan frekuensi napas memiliki nilai rataan 45,06±9,29 napas mnt^{-1} dengan kisaran 28–68 napas mnt^{-1}. Perbedaan nilai minimum dan maksimum menunjukkan bahwa respon fisiologis ternak mengalami perubahan mengikuti kondisi lingkungan yang terjadi selama penelitian. Variasi tersebut menggambarkan adanya penyesuaian biologis sapi perah dalam mempertahankan keseimbangan panas tubuh melalui perubahan aktivitas sistem respirasi dan kardiovaskular. Becker *et al.* (2020) menjelaskan bahwa peningkatan beban panas lingkungan dapat memicu berbagai respon fisiologis pada sapi perah, termasuk peningkatan frekuensi respirasi dan perubahan aktivitas sistem peredaran darah sebagai bagian dari mekanisme adaptasi termal.

IPB University Bogor Indonesia
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.
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University

Hubungan antara karakteristik mikroklimat dan respon fisiologis sapi perah dianalisis menggunakan korelasi *Spearman* karena hasil uji normalitas menunjukkan bahwa data penelitian tidak terdistribusi normal. Analisis regresi linear sederhana dilakukan untuk menggambarkan arah hubungan dan besarnya variasi respon fisiologis yang dapat dijelaskan oleh masing-masing variabel mikroklimat. Analisis korelasi memberikan informasi mengenai kekuatan hubungan antar variabel, sedangkan analisis regresi menggambarkan kontribusi perubahan suhu udara dan kelembapan relatif terhadap variasi respon fisiologis sapi perah. Pendekatan tersebut digunakan sebagai dasar dalam menginterpretasikan hubungan antara kondisi lingkungan dan respon biologis ternak, karena respon termal sapi perah merupakan hasil interaksi antara faktor lingkungan dan kondisi fisiologis individu (Hoffmann *et al.* 2020; Giannone *et al.* 2023). Hasil analisis hubungan antara karakteristik mikroklimat dan respon fisiologis disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Hasil analisis hubungan antara karakteristik mikroklimat dan respon fisiologis sapi perah

Hubungan	Spearman (ρ)	p-value	Persamaan Regresi	R^2	p-value
Ta–HR	0,46	<0,001	HR=55,11+0,79Ta	0,23	<0,001
Ta–RR	0,73	<0,001	RR=4,81+1,74Ta	0,66	<0,001
RH–HR	-0,52	<0,001	HR=96,19−0,28RH	0,24	<0,001
RH–RR	-0,67	<0,001	RR=89,26−0,55RH	0,53	<0,001

Keterangan: R^2: *coefficient of determination*; Ta: suhu udara; RH: kelembapan relatif; HR: denyut jantung; RR: frekuensi napas

Hasil analisis menunjukkan bahwa suhu udara memiliki hubungan positif yang kuat dengan frekuensi napas (ρ=0,73; p<0,001), sedangkan kelembapan relatif memiliki hubungan negatif yang kuat dengan frekuensi napas (ρ=-0,67; p<0,001). Hasil analisis regresi menunjukkan bahwa suhu udara mampu menjelaskan 65,96% variasi frekuensi napas (R^2=0,66), dengan setiap peningkatan suhu udara sebesar 1 °C diikuti peningkatan frekuensi napas sebesar 1,75 napas mnt^{-1}. Sementara itu, kelembapan relatif mampu menjelaskan 53,81% variasi frekuensi napas (R^2=0,53), dengan setiap peningkatan kelembapan relatif sebesar 1% diikuti penurunan frekuensi napas sebesar 0,55 napas mnt^{-1}. Hubungan tersebut menunjukkan bahwa perubahan kondisi mikroklimat, terutama suhu udara, berkaitan erat dengan perubahan aktivitas respirasi sapi perah selama periode pengamatan.

Peningkatan frekuensi napas merupakan salah satu mekanisme utama sapi perah dalam meningkatkan pelepasan panas tubuh ketika beban panas lingkungan meningkat. Peningkatan ventilasi respirasi membantu memperbesar kehilangan panas melalui evaporasi pada saluran pernapasan, sehingga frekuensi napas menjadi salah satu indikator fisiologis yang cepat merespon perubahan lingkungan. Pinto *et al.* (2020) menjelaskan bahwa frekuensi napas merupakan indikator fisiologis yang responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan karena peningkatannya berkaitan langsung dengan kebutuhan ternak untuk meningkatkan pelepasan panas melalui evaporasi. Shu *et al.* (2022) melaporkan bahwa frekuensi napas memiliki sensitivitas tinggi dalam mendeteksi perubahan kondisi termal pada sapi perah laktasi karena perubahan respirasi dapat terjadi sebelum munculnya

IPB University Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

perubahan fisiologis yang lebih kompleks. Oliveira *et al.* (2025) juga menjelaskan bahwa frekuensi napas merupakan salah satu indikator utama dalam identifikasi cekaman panas karena respon respirasi terjadi secara cepat sebagai mekanisme kompensasi terhadap peningkatan beban panas. Hasil penelitian ini menunjukkan pola yang serupa, yaitu variasi suhu udara dan kelembapan relatif diikuti oleh perubahan frekuensi napas dengan hubungan yang kuat. Nilai koefisien determinasi yang relatif tinggi menunjukkan bahwa variasi frekuensi napas selama penelitian sebagian besar dapat dijelaskan oleh perubahan kondisi mikroklimat, sehingga frekuensi napas menjadi indikator fisiologis yang representatif dalam mengevaluasi respon sapi perah terhadap lingkungan.

Berbeda dengan frekuensi napas, hubungan antara variabel mikroklimat dengan denyut jantung menunjukkan kekuatan hubungan yang lebih rendah. Suhu udara memiliki hubungan positif dengan denyut jantung (ρ=0,46; p<0,001), sedangkan kelembapan relatif memiliki hubungan negatif dengan denyut jantung (ρ=-0,52; p<0,001). Analisis regresi menunjukkan bahwa suhu udara menjelaskan 23,00% variasi denyut jantung (R^2=0,23), sedangkan kelembapan relatif menjelaskan 24,00% variasi denyut jantung (R^2=0,24). Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan mikroklimat tetap berkaitan dengan perubahan denyut jantung, tetapi kontribusinya lebih rendah dibandingkan terhadap frekuensi napas. Hal ini menunjukkan bahwa respon kardiovaskular tidak hanya dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, tetapi juga oleh berbagai faktor biologis lain yang berkaitan dengan kondisi fisiologis ternak.

Peningkatan denyut jantung pada kondisi lingkungan dengan beban panas lebih tinggi berkaitan dengan peningkatan aktivitas sistem sirkulasi untuk mendukung distribusi panas tubuh menuju jaringan perifer. Jo dan Lee (2025) melaporkan bahwa peningkatan suhu lingkungan dapat meningkatkan respon kardiovaskular sapi perah sebagai bagian dari mekanisme adaptasi untuk mempertahankan keseimbangan panas tubuh. Dibandingkan dengan frekuensi napas, respon denyut jantung memiliki karakteristik yang lebih kompleks karena dipengaruhi oleh interaksi antara kondisi lingkungan, metabolisme, produksi susu, aktivitas fisik, dan variasi individu ternak. Habiba *et al.* (2025) menunjukkan bahwa perubahan denyut jantung akibat cekaman panas memiliki amplitudo yang lebih rendah dibandingkan perubahan frekuensi napas karena respon kardiovaskular melibatkan regulasi fisiologis yang lebih luas. Frei *et al.* (2022) juga menjelaskan bahwa variasi parameter kardiovaskular antarindividu dapat dipengaruhi oleh kondisi internal ternak, sehingga interpretasi denyut jantung sebagai indikator kondisi termal perlu dilakukan bersama indikator fisiologis lainnya. Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa denyut jantung tetap memberikan informasi mengenai perubahan kondisi fisiologis akibat variasi mikroklimat, tetapi memiliki tingkat variasi yang lebih besar dibandingkan frekuensi napas.

Perbedaan pola respon antara frekuensi napas dan denyut jantung menunjukkan bahwa mekanisme adaptasi termal sapi perah berlangsung melalui beberapa jalur fisiologis yang saling melengkapi. Suhu udara menjadi faktor lingkungan yang secara langsung meningkatkan beban panas tubuh, sedangkan kelembapan relatif memengaruhi efektivitas pelepasan panas melalui proses evaporasi. Hubungan negatif antara kelembapan relatif dengan respon fisiologis pada penelitian ini perlu diinterpretasikan berdasarkan kondisi mikroklimat selama periode pengamatan. Secara fisiologis, kelembapan relatif tinggi umumnya dapat

IPB University Bogor Indonesia
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.
Perpustakaan IPB University

meningkatkan beban panas karena menurunkan efisiensi pelepasan panas melalui evaporasi (Hoffmann *et al.* 2020; Jo dan Lee 2025). Pola hubungan negatif RH terhadap RR dan HR pada penelitian ini kemungkinan lebih menggambarkan pola kovariasi lokal antara suhu udara dan kelembapan relatif selama pengamatan, bukan menunjukkan bahwa peningkatan kelembapan relatif secara langsung menurunkan beban panas ternak. Hoffmann *et al.* (2020) menjelaskan bahwa respon termoregulasi sapi perah terhadap perubahan lingkungan merupakan hasil interaksi berbagai mekanisme fisiologis, termasuk respirasi, sirkulasi darah, dan perubahan metabolisme. Giannone *et al.* (2023) menyatakan bahwa penggunaan beberapa indikator fisiologis secara bersamaan memberikan gambaran kondisi termal yang lebih komprehensif karena setiap indikator memiliki karakteristik respon yang berbeda terhadap perubahan lingkungan.

3.3 Prediksi Respon Fisiologis Sapi Perah Menggunakan *Artificial Neural Network*

Kinerja model ANN dalam memprediksi denyut jantung dan frekuensi napas sapi perah berdasarkan suhu udara dan kelembapan relatif disajikan pada Tabel 3. Evaluasi performa model dilakukan menggunakan nilai MAE, RMSE, dan R^2. Ketiga parameter tersebut umum digunakan dalam evaluasi model regresi, dimana MAE dan RMSE menggambarkan besarnya kesalahan antara nilai observasi dan prediksi, sedangkan R^2 menunjukkan proporsi variasi data observasi yang dapat dijelaskan oleh model. Nilai MAE dan RMSE yang lebih rendah serta nilai R^2 yang lebih tinggi menunjukkan kemampuan model yang lebih baik dalam merepresentasikan pola data aktual (Ruchay *et al.* 2022; Su *et al.* 2025).

Tabel 3 Performa model *Artificial Neural Network*

Variabel	MAE	RMSE	R^2
HR	4,57	5,85	0,51
RR	4,32	5,23	0,69

Keterangan: MAE: *Mean Absolute Error*; RMSE: *Root Mean Square Error*; R^2: *coefficient of determination*; HR: denyut jantung; RR: frekuensi napas

Berdasarkan hasil evaluasi pada Tabel 3, model ANN menunjukkan kemampuan prediksi yang memadai untuk denyut jantung dan relatif baik untuk frekuensi napas. Model prediksi denyut jantung menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,51 dengan MAE sebesar 4,57 denyut mnt^{-1} dan RMSE sebesar 5,85 denyut mnt^{-1}, sedangkan model prediksi frekuensi napas menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,69 dengan MAE sebesar 4,32 napas mnt^{-1} dan RMSE sebesar 5,23 napas mnt^{-1}. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model mampu menangkap pola perubahan respon fisiologis sapi perah berdasarkan variasi suhu udara dan kelembapan relatif, dengan tingkat kemampuan penjelasan yang lebih tinggi pada frekuensi napas dibandingkan denyut jantung.

Interpretasi keberhasilan model prediksi biologis tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan batas nilai R^2 tertentu karena performa model sangat dipengaruhi oleh karakteristik variabel respon, jumlah prediktor, kompleksitas sistem biologis, serta variasi individu ternak. Nilai R^2 yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan ANN mampu mempelajari hubungan antara kondisi mikroklimat dan respon fisiologis, meskipun hanya

IPB University Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

menggunakan suhu udara dan kelembapan relatif sebagai variabel masukan. Da Silva *et al.* (2025) menjelaskan bahwa evaluasi model berbasis *machine learning* pada sistem biologis perlu mempertimbangkan konteks aplikasi dan karakteristik data, bukan hanya menggunakan nilai akurasi sebagai indikator tunggal. Li *et al.* (2024) juga menunjukkan bahwa peningkatan performa prediksi respon fisiologis sapi perah sangat dipengaruhi oleh kelengkapan variabel masukan, terutama ketika model digunakan pada sistem biologis dengan variasi individu yang tinggi.

Kemampuan model dalam memprediksi frekuensi napas yang lebih tinggi dibandingkan denyut jantung menunjukkan bahwa respon respirasi memiliki hubungan yang lebih konsisten dengan perubahan kondisi mikroklimat. Model prediksi frekuensi napas pada penelitian ini menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,69, yang berada pada kisaran performa model prediksi respon fisiologis sapi perah berbasis variabel lingkungan. Yan *et al.* (2024) melaporkan bahwa model *machine learning* untuk memprediksi frekuensi napas sapi perah berdasarkan parameter lingkungan menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,68. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan frekuensi napas dapat diprediksi dengan tingkat ketepatan yang baik menggunakan informasi lingkungan sebagai prediktor utama.

Pendekatan pemodelan berbasis variabel lingkungan juga telah diterapkan pada penelitian lain dengan hasil yang bervariasi sesuai dengan kompleksitas *input* yang digunakan. Shu *et al.* (2023) menunjukkan bahwa ANN mampu memprediksi respon fisiologis sapi perah pada kondisi pemeliharaan aktual dengan memasukkan kombinasi variabel lingkungan, produksi, dan karakteristik ternak. Penambahan informasi biologis tersebut meningkatkan kemampuan model dalam menangkap variasi respon fisiologis dibandingkan model yang hanya menggunakan parameter lingkungan. Mantovani *et al.* (2023) melaporkan bahwa pendekatan berbasis analisis citra mampu menghasilkan prediksi frekuensi napas yang lebih tinggi karena memperoleh informasi langsung dari aktivitas respirasi ternak. Wang *et al.* (2024) juga menunjukkan bahwa model berbasis video mampu meningkatkan akurasi prediksi frekuensi napas melalui ekstraksi pola gerakan respirasi secara langsung.

Perbedaan performa antara model berbasis lingkungan pada penelitian ini dengan model berbasis citra menunjukkan bahwa jenis informasi masukan berperan penting terhadap kemampuan prediksi. Model ANN pada penelitian ini menggunakan suhu udara dan kelembapan relatif sebagai indikator kondisi lingkungan yang berperan dalam pembentukan beban panas, sedangkan metode berbasis citra memperoleh informasi langsung dari respon respirasi ternak. Meskipun memiliki jumlah prediktor yang lebih terbatas, model yang dikembangkan tetap mampu menangkap pola utama perubahan frekuensi napas akibat variasi mikroklimat selama periode pengamatan.

Kemampuan model dalam memprediksi denyut jantung menunjukkan pola yang berbeda dibandingkan frekuensi napas. Nilai R^2 sebesar 0,51 menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan sebagian variasi perubahan denyut jantung, tetapi tingkat ketepatannya lebih rendah dibandingkan model prediksi frekuensi napas. Perbedaan tersebut berkaitan dengan karakteristik fisiologis denyut jantung yang memiliki mekanisme regulasi lebih kompleks. Denyut jantung tidak hanya dipengaruhi oleh kondisi termal, tetapi juga berkaitan dengan aktivitas fisik, status metabolisme, produksi susu, tahap laktasi, serta variasi individu antar ternak.

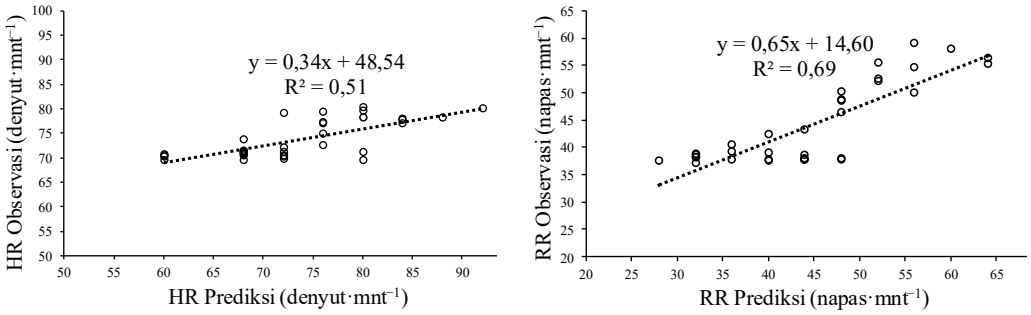
IPB University
Bogor Indonesia
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan 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.
Perpustakaan IPB University

Li *et al.* (2024) menjelaskan bahwa model prediksi parameter fisiologis sapi perah memiliki akurasi yang lebih tinggi ketika informasi lingkungan dikombinasikan dengan faktor individu ternak seperti karakteristik fisiologis dan kondisi produksi. Frei *et al.* (2022) menunjukkan bahwa parameter kardiovaskular pada sapi perah memiliki variasi antar individu yang cukup besar karena mencerminkan interaksi antara respon lingkungan dan kondisi fisiologis internal ternak. Karakteristik tersebut menjelaskan mengapa kemampuan prediksi denyut jantung pada penelitian ini lebih rendah dibandingkan frekuensi napas meskipun kedua parameter dipengaruhi oleh perubahan kondisi termal.

Perbedaan performa prediksi antara frekuensi napas dan denyut jantung juga berkaitan dengan mekanisme adaptasi termal sapi perah. Frekuensi napas merupakan salah satu respon fisiologis awal ketika ternak mengalami peningkatan beban panas karena peningkatan ventilasi respirasi berperan dalam memperbesar pelepasan panas melalui evaporasi. Hoffmann *et al.* (2020) menjelaskan bahwa frekuensi napas merupakan indikator non-invasif yang sensitif untuk mengevaluasi perubahan kondisi termal pada sapi perah. Giannone *et al.* (2023) menyatakan bahwa respon respirasi umumnya mengalami perubahan lebih cepat dibandingkan indikator fisiologis lainnya ketika ternak mengalami peningkatan beban panas.

Sebaliknya, perubahan denyut jantung berkaitan dengan penyesuaian sistem sirkulasi untuk mendukung distribusi panas tubuh, tetapi respon tersebut dipengaruhi oleh berbagai mekanisme fisiologis yang menyebabkan variasinya lebih besar. Habiba *et al.* (2025) melaporkan bahwa respon kardiovaskular sapi perah terhadap cekaman panas memiliki pola yang lebih kompleks dibandingkan respon respirasi. Frei *et al.* (2022) juga menunjukkan bahwa variasi denyut jantung berkaitan dengan kondisi fisiologis individu sehingga interpretasinya perlu mempertimbangkan faktor biologis selain lingkungan.

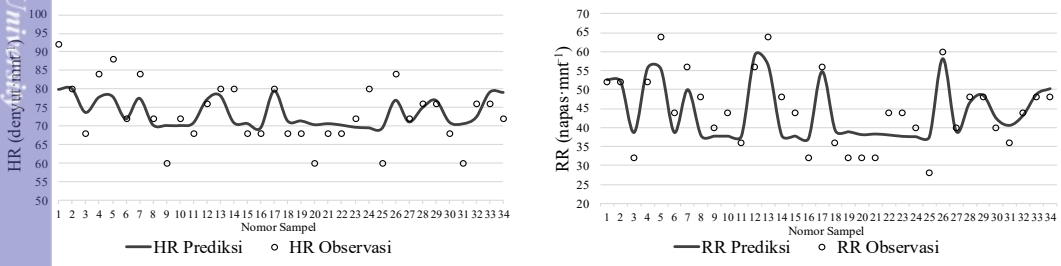
Hubungan antara nilai observasi dan nilai prediksi ANN disajikan pada Gambar 5. Sebagian besar titik pengamatan mengikuti pola hubungan positif antara data observasi dan hasil prediksi. Sebaran titik prediksi frekuensi napas terlihat lebih mendekati garis kesesuaian dibandingkan denyut jantung, menunjukkan kemampuan model yang lebih baik dalam menangkap variasi respon respirasi. Pola tersebut sesuai dengan hasil evaluasi model, dimana prediksi frekuensi napas memiliki nilai R^2 lebih tinggi serta nilai kesalahan prediksi yang lebih rendah dibandingkan denyut jantung.



Gambar 5 Hubungan antara oservasi dan prediksi *Artificial Neural Network*

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

Kemampuan model dalam mengikuti pola perubahan respon fisiologis selama periode pengamatan juga terlihat pada Gambar 6. Nilai prediksi mengikuti kecenderungan perubahan data observasi, meskipun masih terdapat beberapa deviasi pada titik tertentu. Perbedaan antara nilai observasi dan prediksi merupakan karakteristik yang umum ditemukan pada model berbasis data biologis karena respon fisiologis ternak dipengaruhi oleh interaksi antara faktor lingkungan dan faktor internal individu. Rebez *et al.* (2024) menjelaskan bahwa ANN memiliki kemampuan dalam mempelajari hubungan nonlinier pada sistem biologis yang kompleks. Shu *et al.* (2023) menunjukkan bahwa pendekatan ANN dapat digunakan untuk memodelkan respon fisiologis sapi perah pada kondisi pemeliharaan aktual dengan berbagai kombinasi variabel masukan.



Gambar 6 Komparasi nilai observasi dan prediksi *Artificial Neural Network*

Kemampuan ANN dalam penelitian ini menunjukkan bahwa hubungan nonlinier antara kondisi mikroklimat dan respon fisiologis sapi perah dapat direpresentasikan berdasarkan suhu udara dan kelembapan relatif. Performa model yang lebih tinggi pada frekuensi napas menunjukkan bahwa parameter respirasi memiliki hubungan yang lebih konsisten terhadap perubahan lingkungan dibandingkan denyut jantung. Idris *et al.* (2021) menjelaskan bahwa frekuensi respirasi merupakan salah satu indikator fisiologis yang mengalami perubahan awal ketika sapi mengalami peningkatan beban panas. Ruban *et al.* (2020) menyatakan bahwa peningkatan frekuensi respirasi berfungsi meningkatkan pelepasan panas melalui evaporasi saluran pernapasan.

Sensitivitas frekuensi napas terhadap perubahan kondisi termal menyebabkan parameter tersebut banyak digunakan sebagai indikator evaluasi cekaman panas pada sapi perah (Gaughan *et al.* 2000). Shu *et al.* (2021) menunjukkan bahwa variasi respon respirasi memiliki hubungan yang lebih konsisten dengan perubahan variabel lingkungan dibandingkan beberapa parameter fisiologis lainnya. Kondisi tersebut mendukung hasil penelitian ini, dimana model ANN mampu memprediksi frekuensi napas dengan tingkat kemampuan penjelasan yang lebih tinggi dibandingkan denyut jantung berdasarkan informasi mikroklimat.

3.4 Interpretasi Kondisi Termal Berdasarkan Respon Fisiologis

Interpretasi kondisi termal pada penelitian ini dilakukan berdasarkan kombinasi denyut jantung dan frekuensi napas yang diperoleh dari hasil prediksi model *Artificial Neural Network*. Pendekatan berbasis respon fisiologis digunakan karena parameter fisiologis merepresentasikan respon aktual ternak terhadap beban panas yang diterima, sedangkan indikator lingkungan seperti suhu udara dan kelembapan relatif hanya menggambarkan kondisi eksternal. Perbedaan tersebut

IPB University Bogor Indonesia
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.
Perpustakaan IPB University

menjadi dasar pengembangan pendekatan berbasis fisiologis dalam penelitian ini, karena dua kondisi lingkungan yang serupa belum tentu menghasilkan respon fisiologis yang sama pada setiap individu ternak. Meskipun demikian, literatur menunjukkan bahwa belum terdapat batas fisiologis yang bersifat universal untuk menentukan kondisi *heat stress* pada sapi perah karena respon ternak dipengaruhi oleh faktor individu, produksi, tahap laktasi, bangsa, serta kondisi manajemen pemeliharaan (Hoffmann *et al.* 2020).

Kriteria klasifikasi pada penelitian ini disusun melalui sintesis literatur mengenai rentang fisiologis normal dan perubahan respon termoregulasi sapi perah ketika mengalami peningkatan beban panas. Frekuensi napas ditempatkan sebagai indikator utama karena perubahan parameter tersebut merupakan salah satu respon awal ketika ternak mengalami peningkatan beban panas, sedangkan denyut jantung digunakan sebagai indikator pendukung untuk memperkuat interpretasi perubahan kondisi fisiologis. Penyusunan kriteria tersebut dilakukan dengan mempertimbangkan konsistensi temuan dari berbagai penelitian yang melaporkan perubahan parameter fisiologis pada kondisi termonetral maupun selama peningkatan beban panas. Pendekatan sintesis literatur dipilih untuk memperoleh batas klasifikasi yang sesuai dengan karakteristik fisiologis sapi perah laktasi tanpa bergantung pada satu sumber referensi tunggal. Kriteria interpretasi kondisi termal yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4 Kriteria klasifikasi kondisi termal berbasis fisiologis

Kategori	Kriteria	Referensi
Nyaman	HR ≤80 dan RR ≤45	Hoffmann *et al.* (2020); Oliveira *et al.* (2025); Yan *et al.* (2021)
Adaptif	HR 81–95 atau RR 46–60	Hoffmann *et al.* (2020); Hahn (1997); Oliveira *et al.* (2025)
Heat Stress	HR >95 atau RR >60	Galán *et al.* (2018); Oliveira *et al.* (2025); Islam *et al.* (2021)

Keterangan: HR: denyut jantung; RR: frekuensi napas

Frekuensi napas digunakan sebagai indikator utama dalam klasifikasi karena memiliki hubungan yang erat dengan mekanisme pelepasan panas melalui evaporasi. Ketika beban panas lingkungan meningkat, sapi meningkatkan frekuensi respirasi untuk meningkatkan kehilangan panas melalui saluran pernapasan sebelum terjadi gangguan keseimbangan termal yang lebih berat. Galán *et al.* (2018) melalui kajian sistematis terhadap indikator biologis *heat stress* pada sapi perah menyatakan bahwa frekuensi napas merupakan salah satu indikator berbasis ternak yang paling sering digunakan untuk mendeteksi perubahan kondisi termal. Oliveira *et al.* (2025) menjelaskan bahwa peningkatan frekuensi napas dapat terjadi lebih awal dibandingkan perubahan beberapa indikator fisiologis lainnya karena merupakan mekanisme kompensasi utama dalam pelepasan panas. Dalcin *et al.* (2016) juga menunjukkan bahwa parameter respirasi memiliki hubungan yang lebih konsisten dengan kondisi *heat stress* dibandingkan beberapa parameter fisiologis lainnya. Karakteristik tersebut menjadi dasar penggunaan frekuensi napas sebagai parameter utama dalam penyusunan klasifikasi kondisi termal pada penelitian ini.

Kategori nyaman menggambarkan kondisi ketika ternak masih mampu mempertahankan keseimbangan panas tubuh tanpa aktivasi mekanisme termoregulasi yang tinggi. Batas RR ≤45 napas mnt^{-1} pada penelitian ini disusun

IPB University Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

berdasarkan kisaran fisiologis sapi perah pada kondisi termonetral serta mempertimbangkan variasi yang dilaporkan pada berbagai sistem pemeliharaan. De Andrade Ferrazza *et al.* (2017) melaporkan bahwa sapi *Friesian Holstein* pada kondisi termonetral memiliki frekuensi napas sebesar 39,70 napas mnt^{-1} dan denyut jantung sebesar 66,23 denyut mnt^{-1}. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kondisi tanpa tekanan panas umumnya ditandai oleh aktivitas respirasi dan kardiovaskular yang masih rendah. Tresoldi *et al.* (2025) melaporkan bahwa kisaran frekuensi napas normal bagian atas pada sapi perah dapat berada pada rentang 30–50 napas mnt^{-1}, tergantung pada kondisi lingkungan dan karakteristik ternak. Variasi tersebut menunjukkan bahwa penggunaan batas RR ≤45 pada penelitian ini bersifat konservatif untuk menggambarkan kondisi ketika sapi masih berada dalam kondisi fisiologis yang relatif stabil. Batas HR <80 denyut mnt^{-1} digunakan sebagai pendukung karena nilai tersebut masih berada dalam kisaran fisiologis basal yang dilaporkan pada sapi perah tanpa tekanan panas.

Kategori adaptif menggambarkan kondisi transisi ketika mekanisme termoregulasi mulai mengalami peningkatan aktivitas, tetapi ternak masih mampu mempertahankan keseimbangan panas tubuh. Peningkatan RR pada rentang 46–60 napas mnt^{-1} menunjukkan bahwa kebutuhan pelepasan panas melalui evaporasi mulai meningkat, tetapi belum selalu menunjukkan kondisi *heat stress* berat. Shu *et al.* (2022) melaporkan bahwa frekuensi napas mulai mengalami peningkatan ketika kondisi lingkungan melewati batas tertentu, dengan titik perubahan fisiologis pada sapi laktasi terjadi sekitar 53,8 napas mnt^{-1} berdasarkan analisis *segmented mixed model*. Oliveira *et al.* (2025) merangkum beberapa penelitian yang menunjukkan bahwa sapi laktasi dapat memiliki RR sebesar 46,8–51,9 napas mnt^{-1} pada kondisi THI <70, sedangkan peningkatan yang lebih tinggi terjadi ketika THI melebihi 70. Hahn (1997) menjelaskan bahwa perubahan fisiologis ternak akibat peningkatan beban panas berlangsung secara bertahap sehingga diperlukan kategori transisi untuk membedakan kondisi adaptasi awal dari kondisi *heat stress* yang lebih jelas. Rentang adaptif pada penelitian ini digunakan untuk menangkap fase ketika respon fisiologis telah meningkat akibat perubahan lingkungan, tetapi belum menunjukkan gangguan termoregulasi yang lebih berat.

Kategori *heat stress* menunjukkan kondisi ketika peningkatan aktivitas fisiologis telah melewati batas adaptasi normal. Batas RR >60 napas mnt^{-1} digunakan karena berbagai penelitian menunjukkan bahwa peningkatan respirasi pada kisaran tersebut telah berkaitan dengan kondisi *heat stress* pada sapi perah. Galán *et al.* (2018) melaporkan bahwa RR lebih dari 60 napas mnt^{-1} sering digunakan sebagai indikator peningkatan beban panas pada sapi perah. Oliveira *et al.* (2025) juga menjelaskan bahwa RR 60–80 napas mnt^{-1} dapat dikategorikan sebagai kondisi kewaspadaan terhadap *heat stress*, sedangkan nilai di atas 80 napas mnt^{-1} menunjukkan kondisi yang lebih berat. Islam *et al.* (2021) menjelaskan bahwa sistem pemantauan otomatis pada sapi menggunakan peningkatan RR sebagai indikator penting untuk menentukan kebutuhan mitigasi *heat stress*. Rentang RR >60 pada penelitian ini dipilih sebagai batas yang lebih sensitif untuk mendeteksi perubahan fisiologis akibat peningkatan beban panas, terutama karena penelitian dilakukan pada sapi perah laktasi di lingkungan dataran tinggi dengan variasi mikroklimat yang relatif dinamis.

Denyut jantung digunakan sebagai indikator pendukung dalam klasifikasi karena perubahan aktivitas kardiovaskular merupakan bagian dari mekanisme

IPB University Bogor Indonesia
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.
Perpustakaan IPB University

adaptasi terhadap peningkatan suhu lingkungan. Peningkatan denyut jantung berhubungan dengan kebutuhan distribusi panas melalui peningkatan aliran darah perifer dan perubahan aktivitas metabolik tubuh. Giannone *et al.* (2023) menjelaskan bahwa peningkatan beban panas dapat memengaruhi respon kardiovaskular sapi perah melalui perubahan distribusi panas tubuh. Respon denyut jantung terhadap *heat stress* memiliki variasi yang lebih besar dibandingkan frekuensi napas. Galán *et al.* (2018) menunjukkan bahwa beberapa penelitian melaporkan peningkatan denyut jantung selama *heat stress*, sedangkan penelitian lain menunjukkan perubahan yang lebih kecil atau bahkan penurunan akibat mekanisme adaptasi tertentu. De Andrade Ferrazza *et al.* (2017) melaporkan bahwa sapi *Friesian Holstein* pada kondisi *heat stress* eksperimental memiliki denyut jantung 62,13 denyut mnt^{-1}, lebih rendah dibandingkan kelompok termonetral sebesar 66,23 denyut mnt^{-1}. Variasi tersebut menunjukkan bahwa HR lebih tepat digunakan sebagai parameter penguat interpretasi dibandingkan sebagai indikator tunggal penentuan kondisi *heat stress*.

Berdasarkan sintesis fisiologis tersebut, klasifikasi kondisi termal pada penelitian ini menggunakan kombinasi HR dan RR dengan mempertimbangkan sensitivitas frekuensi napas terhadap perubahan beban panas serta kontribusi denyut jantung dalam menggambarkan respon kardiovaskular ternak. Kriteria ini digunakan sebagai kerangka interpretasi biologis untuk sapi perah *Friesian Holstein* laktasi pada kondisi lingkungan penelitian, sehingga perubahan kategori mencerminkan perubahan respon fisiologis yang diprediksi oleh model ANN. Distribusi kondisi termal berdasarkan kombinasi suhu udara dan kelembapan relatif melalui hasil prediksi ANN disajikan pada Gambar 7 dan Gambar 8.

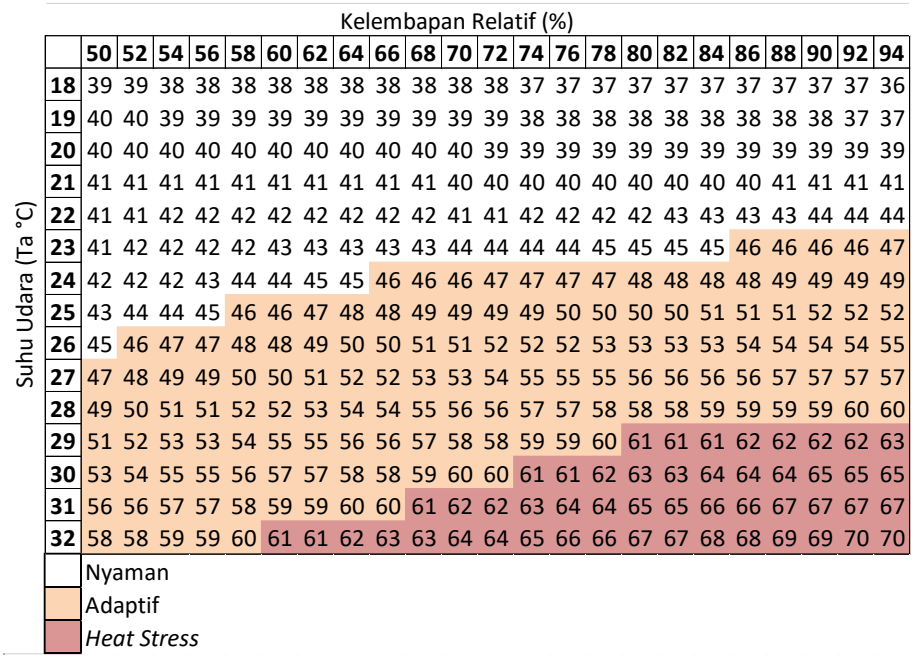
Kelembapan Relatif (%)

Suhu Udara (Ta °C)	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90	92	94
18	76	76	76	75	75	74	74	74	73	73	72	72	71	71	71	70	70	69	69	68	68	68	67
19	78	78	77	77	76	76	76	75	75	74	74	73	73	73	72	72	71	71	71	70	70	69	69
20	79	79	79	78	78	78	77	77	76	76	76	75	75	74	74	73	73	73	72	72	71	71	70
21	80	80	80	80	80	79	79	78	78	78	77	77	76	76	75	75	75	74	73	73	72	71	71
22	81	81	81	81	81	81	80	80	80	79	79	78	78	77	76	76	75	74	74	73	72	72	71
23	81	81	82	82	82	82	82	81	81	80	79	79	78	77	77	76	75	75	74	73	73	72	71
24	82	82	82	82	82	82	82	82	81	81	80	79	79	78	77	76	76	75	74	74	73	72	72
25	82	82	81	81	81	81	81	81	81	81	80	80	79	78	78	77	76	76	75	74	73	73	72
26	81	81	81	81	81	81	81	81	80	80	80	80	79	79	78	77	77	76	75	75	74	73	73
27	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	79	78	78	77	76	76	75	74	74	73
28	80	80	80	80	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	78	77	77	76	75	75	74	73
29	79	79	79	79	79	79	79	79	79	78	78	78	78	78	78	78	78	77	76	76	75	74	74
30	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	77	77	77	77	76	76	76	75
31	78	78	78	78	78	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	76
32	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	76	76	77	77	77	77	77	78	78	78	78	77

Nyaman
Adaptif
Heat Stress

Gambar 7 *Response surface* hasil prediksi *Artificial Neural Network* terhadap denyut jantung pada berbagai kombinasi suhu udara dan kelembapan relative

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University



Suhu Udara (Ta °C) \ Kelembapan Relatif (%)	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90	92	94
18	39	39	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	36
19	40	40	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	38	38	38	38	38	38	38	38	38	37	37
20	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39
21	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	40	40	40	40	40	40	40	40	40	41	41	41	41
22	41	41	42	42	42	42	42	42	42	42	41	41	42	42	42	42	43	43	43	43	44	44	44
23	41	42	42	42	42	43	43	43	43	43	44	44	44	44	45	45	45	45	46	46	46	46	47
24	42	42	42	43	44	44	45	45	46	46	46	47	47	47	47	48	48	48	48	49	49	49	49
25	43	44	44	45	46	46	47	48	48	49	49	49	49	50	50	50	50	51	51	51	52	52	52
26	45	46	47	47	48	48	49	50	50	51	51	52	52	52	53	53	53	53	54	54	54	54	55
27	47	48	49	49	50	50	51	52	52	53	53	54	55	55	55	56	56	56	56	57	57	57	57
28	49	50	51	51	52	52	53	54	54	55	56	56	57	57	58	58	58	59	59	59	59	60	60
29	51	52	53	53	54	55	55	56	56	57	58	58	59	59	60	61	61	61	62	62	62	62	63
30	53	54	55	55	56	57	57	58	58	59	60	60	61	61	62	63	63	64	64	64	65	65	65
31	56	56	57	57	58	59	59	60	60	61	62	62	63	64	64	65	65	66	66	67	67	67	67
32	58	58	59	59	60	61	61	62	63	63	64	64	65	66	66	67	67	68	68	69	69	70	70

Gambar 8 *Response surface* hasil prediksi *Artificial Neural Network* terhadap respirasi pada berbagai kombinasi suhu udara dan kelembapan relatif

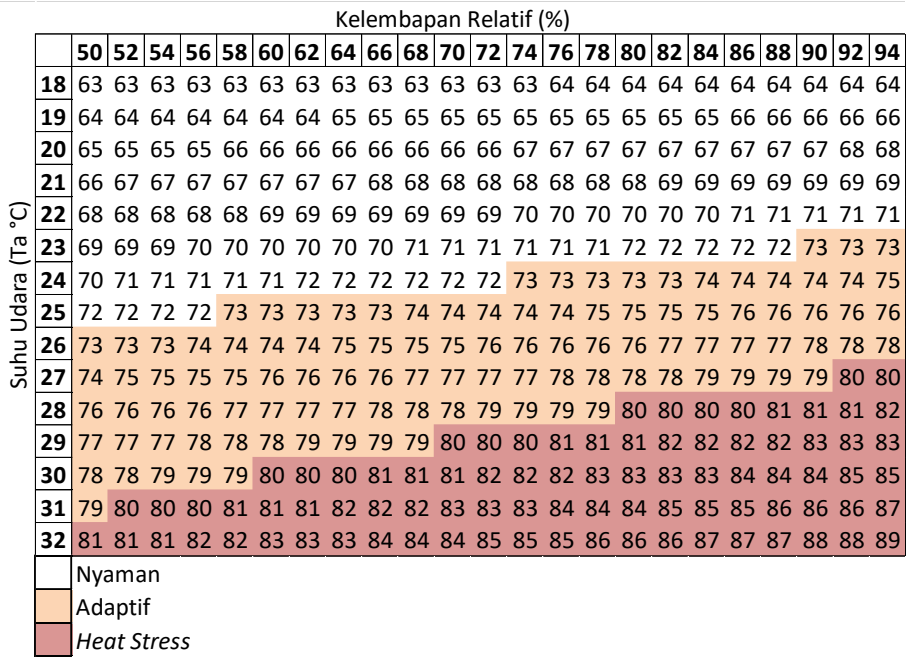
Pola distribusi kondisi termal berdasarkan prediksi denyut jantung menunjukkan bahwa sebagian besar kombinasi suhu udara dan kelembapan relatif masih berada pada kategori nyaman. Area adaptif dan *heat stress* muncul pada wilayah mikroklimat dengan peningkatan beban panas yang lebih tinggi. Pola tersebut menunjukkan bahwa perubahan denyut jantung tidak selalu mengalami peningkatan secara langsung pada seluruh rentang kondisi lingkungan yang diamati. Distribusi berdasarkan frekuensi napas menunjukkan perubahan kategori yang lebih jelas dibandingkan denyut jantung. Area nyaman lebih dominan pada kondisi suhu udara yang lebih rendah, sedangkan kategori adaptif berkembang pada kombinasi suhu udara dan kelembapan relatif yang lebih tinggi. Zona *heat stress* mulai muncul ketika kombinasi kondisi mikroklimat menyebabkan peningkatan respon respirasi yang lebih besar.

Perbedaan pola antara HR dan RR mendukung penggunaan frekuensi napas sebagai indikator utama dalam interpretasi kondisi termal. Peningkatan frekuensi respirasi yang lebih cepat dibandingkan perubahan denyut jantung mencerminkan karakteristik fisiologis sapi dalam mempertahankan keseimbangan panas melalui mekanisme evaporasi. Oliveira *et al.* (2025) menjelaskan bahwa perubahan respirasi merupakan salah satu indikator awal peningkatan beban panas pada sapi perah. Giannone *et al.* (2023) juga menyatakan bahwa respon respirasi memiliki hubungan yang erat dengan aktivasi mekanisme termoregulasi selama periode peningkatan suhu lingkungan.

3.5 Perbandingan Penilaian Kondisi Termal Berdasarkan Respon Fisiologis dan *Temperature Humidity Indeks*

Distribusi kondisi termal berdasarkan THI pada berbagai kombinasi suhu udara dan kelembapan relatif disajikan pada Gambar 9.

IPB University Bogor Indonesia
@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.
Perpustakaan IPB University



Gambar 9 Distribusi spasial *Temperature Humidity Index* pada berbagai kombinasi suhu udara dan kelembapan relatif

Peta distribusi THI menunjukkan bahwa area nyaman terkonsentrasi pada kombinasi suhu udara yang lebih rendah, sedangkan area adaptif dan *heat stress* semakin meluas seiring peningkatan suhu udara dan kelembapan relatif. Perubahan kategori tersebut mencerminkan fungsi THI sebagai indikator lingkungan yang mengintegrasikan pengaruh suhu udara dan kelembapan relatif ke dalam satu nilai indeks untuk menggambarkan tingkat risiko cekaman panas pada sapi perah (Galán *et al.* 2018; Hoffmann *et al.* 2020; Oliveira *et al.* 2025). Perubahan distribusi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan suhu udara dan kelembapan relatif memberikan kontribusi yang bersifat kumulatif terhadap peningkatan nilai THI. Perubahan kategori pada peta tidak hanya dipengaruhi oleh satu faktor lingkungan, tetapi merupakan hasil interaksi kedua parameter mikroklimat yang secara bersama-sama memengaruhi potensi terjadinya cekaman panas. Penggunaan THI masih banyak diterapkan karena sederhana dan mudah diinterpretasikan, meskipun indeks ini pada dasarnya menggambarkan tingkat risiko lingkungan, bukan respon biologis aktual yang ditunjukkan oleh individu ternak (Hoffmann *et al.* 2020; Mylostyvyi dan Izhboldina 2025).

Perbandingan antara distribusi THI dan distribusi kondisi termal berdasarkan respon fisiologis menunjukkan pola yang secara umum serupa. Area nyaman didominasi oleh kombinasi suhu udara yang lebih rendah, sedangkan area adaptif dan *heat stress* semakin meluas seiring meningkatnya suhu udara dan kelembapan relatif. Kesamaan pola tersebut menunjukkan bahwa perubahan kondisi lingkungan yang direpresentasikan oleh THI berkaitan erat dengan perubahan respon fisiologis sapi perah. Hubungan tersebut menunjukkan bahwa perubahan kondisi mikroklimat secara umum diikuti oleh perubahan mekanisme termoregulasi yang berlangsung dalam arah yang sama. Semakin tinggi beban panas yang diterima ternak, semakin besar kebutuhan aktivasi mekanisme fisiologis untuk mempertahankan suhu tubuh tetap berada dalam kisaran normal. Peningkatan suhu lingkungan dan kelembapan

IPB University Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

relatif meningkatkan beban panas yang diterima ternak sehingga mengaktifkan mekanisme termoregulasi, yang ditandai dengan peningkatan frekuensi respirasi dan perubahan denyut jantung untuk mempertahankan keseimbangan panas tubuh (Bernabucci *et al.* 2014; Collier *et al.* 2019). Yan *et al.* (2021) juga melaporkan bahwa frekuensi respirasi merupakan salah satu indikator fisiologis yang merespon lebih awal terhadap peningkatan THI dibandingkan indikator fisiologis lainnya. Tingkat kesesuaian antara klasifikasi kondisi termal berdasarkan respon fisiologis dan THI disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5 Matriks konfusi dan tingkat kesesuaian klasifikasi fisiologis dan *Temperature Humidity Index*

		THI (n data)		
		Nyaman	**Adaptif**	***Heat Stress***
Prediksi ANN (n data)	**Nyaman**	109	0	0
	Adaptif	34	107	39
	Heat Stress	0	0	56
	Tingkat Kesesuaian	**85.29%**		

Keterangan: THI: *Temperature Humidity Index*. Persentase tingkat kesesuaian dihitung berdasarkan data uji (*testing dataset*), sedangkan matriks jumlah data disusun berdasarkan hasil prediksi pada seluruh grid *response surface* (345 kombinasi suhu udara dan kelembapan relatif).

Hasil matriks konfusi menunjukkan tingkat kesesuaian sebesar 85,29%, yang mengindikasikan bahwa sebagian besar klasifikasi yang dihasilkan oleh pendekatan fisiologis dan THI berada pada kategori yang sama. Tingginya tingkat kesesuaian tersebut menunjukkan bahwa pendekatan berbasis respon fisiologis memiliki kemampuan yang baik dalam merepresentasikan perubahan kondisi termal yang juga tercermin melalui indikator lingkungan. Hasil prediksi ANN tidak hanya menghasilkan estimasi parameter fisiologis, tetapi juga mampu memberikan klasifikasi kondisi termal yang konsisten terhadap pola perubahan mikroklimat. Tingkat kesesuaian tersebut menunjukkan bahwa perubahan kondisi mikroklimat yang direpresentasikan oleh THI pada umumnya diikuti oleh perubahan respon fisiologis ternak yang searah. Temuan ini mendukung bahwa THI tetap mampu menggambarkan risiko lingkungan yang berkaitan dengan perubahan respon biologis sapi perah, meskipun indikator fisiologis memberikan representasi yang lebih langsung terhadap kondisi termal yang benar-benar dialami ternak (Galán *et al.* 2018; Hoffmann *et al.* 2020; Chrást *et al.* 2023).

Meskipun memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi, kedua pendekatan tidak menghasilkan klasifikasi yang identik pada seluruh kombinasi kondisi lingkungan. Matriks konfusi menunjukkan bahwa ketidaksesuaian hanya terjadi pada batas antara kategori nyaman dan adaptif serta antara kategori adaptif dan *heat stress*. Tidak ditemukan perbedaan klasifikasi secara langsung antara kategori nyaman dan *heat stress*. Pola tersebut menunjukkan bahwa THI dan pendekatan fisiologis memiliki kesepakatan yang tinggi dalam mengidentifikasi kondisi yang jelas nyaman maupun kondisi yang telah mengalami *heat stress*, sedangkan perbedaan interpretasi lebih banyak muncul pada wilayah transisi ketika beban panas mulai meningkat tetapi respon fisiologis antar individu belum berkembang secara seragam.

IPB University Bogor Indonesia
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.
© Hak cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University

Distribusi ketidaksesuaian yang terkonsentrasi pada zona transisi memberikan dukungan biologis terhadap keberadaan kategori adaptif yang digunakan pada penelitian ini. Apabila perubahan kondisi termal berlangsung secara langsung dari kondisi nyaman menuju *heat stress*, maka ketidaksesuaian klasifikasi diperkirakan akan lebih banyak terjadi antara kedua kategori tersebut. Sebaliknya, hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh ketidaksesuaian berada pada fase transisi, yang mengindikasikan bahwa respon fisiologis berkembang secara bertahap sebelum ternak mencapai kondisi *heat stress*. Jeelani *et al.* (2019) melaporkan bahwa perubahan fisiologis pada sapi perah berkembang secara progresif seiring peningkatan THI, dengan fase transisi sebelum terjadinya gangguan homeostasis yang lebih nyata. Oliveira *et al.* (2025) juga menjelaskan bahwa adaptasi fisiologis merupakan proses bertahap sehingga respon biologis tidak selalu berubah secara bersamaan pada seluruh individu.

Perbedaan klasifikasi pada fase transisi juga dapat dijelaskan oleh konsep dasar masing-masing pendekatan. THI merupakan indikator berbasis lingkungan yang menggambarkan tingkat risiko cekaman panas berdasarkan kondisi mikroklimat, sedangkan indikator fisiologis menggambarkan respon aktual yang ditunjukkan ternak terhadap kondisi tersebut. Dengan demikian, kedua pendekatan mengukur aspek yang berbeda dari proses yang sama. Galán *et al.* (2018) menjelaskan bahwa indikator berbasis hewan memberikan informasi mengenai respon biologis individu terhadap lingkungan, sedangkan indikator berbasis lingkungan menggambarkan tingkat risiko yang dihadapi ternak.

Variasi respon individu menyebabkan ternak yang berada pada kondisi lingkungan yang sama tidak selalu menunjukkan respon fisiologis yang identik. Faktor seperti tingkat produksi susu, status fisiologis, aktivitas ternak, konsumsi pakan, serta kemampuan adaptasi individu dapat memengaruhi besarnya respon terhadap peningkatan beban panas (Becker *et al.* 2020). Yan *et al.* (2021) juga menunjukkan bahwa ambang THI yang memicu peningkatan frekuensi respirasi dapat berbeda menurut karakteristik sapi, termasuk tingkat produksi dan fase laktasi. Variasi tersebut menjelaskan mengapa sebagian kombinasi suhu udara dan kelembapan relatif masih menghasilkan klasifikasi yang berbeda meskipun berada pada kategori THI yang sama.

THI dan indikator fisiologis tidak dapat dipandang sebagai pendekatan yang saling menggantikan, tetapi bersifat saling melengkapi. Penggunaan kedua pendekatan secara bersamaan memungkinkan evaluasi kondisi termal dilakukan dari dua sudut pandang yang berbeda, yaitu tingkat paparan lingkungan dan respon biologis yang dihasilkan. THI memberikan informasi mengenai tingkat risiko lingkungan secara cepat dan praktis, sedangkan indikator fisiologis menunjukkan dampak biologis yang benar-benar dialami ternak. Integrasi indikator berbasis lingkungan dan indikator berbasis hewan menghasilkan penilaian kondisi termal yang lebih komprehensif dibandingkan penggunaan salah satu pendekatan secara terpisah (Galán *et al.* 2018; Hoffmann *et al.* 2020; Mylostyvyi dan Izhboldina 2025). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa klasifikasi kondisi termal berbasis respon fisiologis memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi dengan THI, namun tetap mampu memberikan informasi biologis yang tidak sepenuhnya dapat dijelaskan oleh indikator lingkungan, terutama pada fase transisi antara kondisi adaptif dan *heat stress*.

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

IV SIMPULAN DAN SARAN

4.1 Simpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan model ANN untuk memprediksi respon fisiologis sapi perah berdasarkan suhu udara dan kelembapan relatif sebagai dasar penilaian kondisi termal. Model yang dikembangkan mampu memprediksi denyut jantung dan frekuensi napas, kemudian menginterpretasikan hasil prediksi tersebut ke dalam kategori kondisi termal sapi perah. Klasifikasi kondisi termal berbasis respon fisiologis menunjukkan bahwa perubahan kondisi ternak berlangsung secara bertahap melalui fase respon adaptif sebelum berkembang menjadi kondisi *heat stress* serta menunjukkan tingkat kesesuaian yang baik terhadap klasifikasi berbasis THI. Frekuensi napas merupakan indikator fisiologis yang lebih sensitif terhadap perubahan mikroklimat dibandingkan denyut jantung. Pendekatan berbasis respon fisiologis menggunakan ANN berpotensi menjadi metode pelengkap dalam penilaian kondisi termal berbasis THI karena mempertimbangkan respon biologis sapi perah terhadap perubahan mikroklimat.

4.2 Saran

Pendekatan berbasis respon fisiologis menggunakan ANN dapat dipertimbangkan sebagai pelengkap penilaian kondisi termal berbasis THI dalam pemantauan lingkungan peternakan sapi perah. Integrasi kedua pendekatan diharapkan menghasilkan evaluasi kondisi termal yang lebih representatif terhadap respon biologis ternak sehingga dapat mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan lingkungan kandang dan peningkatan kesejahteraan sapi perah.

Pengembangan penelitian selanjutnya perlu dilakukan dengan melibatkan jumlah ternak yang lebih besar, variasi fase laktasi, musim pengamatan, dan kondisi agroekosistem yang lebih beragam untuk meningkatkan kemampuan generalisasi model. Penambahan variabel mikroklimat, indikator fisiologis, maupun parameter produksi juga diperlukan untuk mengembangkan model prediksi kondisi termal yang lebih komprehensif dan memiliki tingkat penerapan yang lebih luas.

IPB University
Bogor Indonesia
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.
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

DAFTAR PUSTAKA

A'ini KNS, Dudi D, Christi RF. 2021. Relationship between first calving Friesian Holstein age and days open with milk production of dairy cows on second and third lactation in BPPIBTSP Bunikasih Cianjur. *JIPT*. 9(3):372–384. doi:10.23960/jipt.v9i3.372-384.

Asmarasari SA, Azizah N, Sutikno S, Puastuti W, Amir A, Praharani L, Rusdiana S, Hidayat C, Hafid A, Kusumaningrum DA, *et al.* 2023. A review of dairy cattle heat stress mitigation in Indonesia. *Vet World*. 16(5):1098–1108. doi:10.14202/vetworld.2023.1098-1108.

Bahri TM, Salman LB, Christi RF. 2022. Hubungan antara lingkar dada, tinggi pundak, dan panjang badan dengan produksi susu sapi perah Friesian Holstein laktasi di BPPIBTSP Bunikasih Cianjur. *JTAPRO*. 23(2):99–109. doi:10.21776/ub.jtapro.2022.023.02.2.

Baumgard LH, Rhoads RP. 2012. Ruminant nutrition symposium: ruminant production and metabolic responses to heat stress. *J Anim Sci*. 90(6):1855–1865. doi:10.2527/jas.2011-4675.

Becker CA, Collier RJ, Stone AE. 2020. Invited review: physiological and behavioral effects of heat stress in dairy cows. *J Dairy Sci*. 103(8):6751–6770. doi:10.3168/jds.2019-17929.

Bernabucci U, Biffani S, Buggiotti L, Vitali A, Lacetera N, Nardone A. 2014. The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle. *J Dairy Sci*. 97(1):471–486. doi:10.3168/jds.2013-6611.

Bishop CM. 2006. *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York (US): Springer.

Bohmanova J, Misztal I, Cole JB. 2007. Temperature-humidity indices as indicators of milk production losses due to heat stress. *J Dairy Sci*. 90(4):1947–1956. doi:10.3168/jds.2006-513.

[BPS] Badan Pusat Statistik. 2025. Populasi sapi perah menurut provinsi (ekor), 2025. [diakses 2026 Mar 25]. https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/NDcwIzI%3D/populasi-sapi-perah-menurut-provinsi.html.

[BPS] Badan Pusat Statistik. 2025. Produksi susu perusahaan sapi perah, 2025. [diakses 2026 Mar 25]. https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/Mzc2IzI%3D/produksi-susu-perusahaan-sapi-perah.html.

Chrást V, Langová L, Novotná I, Zemanová M, Vrtková I, Urban T, Doležal P, Havlíček Z. 2023. Effect of temperature-humidity index on physiological and haematological indicators in dairy cows. *J Cent Eur Agric*. 24(4):802–808. doi:10.5513/JCEA01/24.4.3960.

Christi RF, Indrijani H, Tasripin DS, Suharwanto D. 2020. Evaluasi produksi susu sapi perah Friesian Holstein pada berbagai laktasi di BPPIBTSP Bunikasih Cianjur. *JIPP*. 8(1):60–64.

Collier R, Renquist BJ, Xiao Y. 2017. A 100-year review: stress physiology including heat stress. *J Dairy Sci*. 100(12):10367–10380. doi:10.3168/jds.2017-13676.

Collier RJ, Baumgard LH, Zimbelman RB, Xiao Y. 2019. Heat stress: physiology of acclimation and adaptation. *Anim Front*. 9(1):12–19. doi:10.1093/af/vfy031.

Collier RJ, Gebremedhin KG. 2015. Thermal biology of domestic animals. *Annu Rev Anim Biosci*. 3:513–532. doi:10.1146/annurev-animal-022114-110659.

D'Agostino RB, Belanger A, D'Agostino RB Jr. 1990. A suggestion for using powerful and informative tests of normality. *Am Stat*. 44(4):316–321. doi:10.1080/00031305.1990.10475751.

Dalcin VC, Fischer V, Daltro DS, Alfonzo EPM, Stumpf MT, Kolling GJ, Silva MVGB, McManus C. 2016. Physiological parameters for thermal stress in dairy cattle. *Rev Bras Zootec*. 45(8):458–465. doi:10.1590/S1806-92902016000800006.

De Andrade Ferrazza R, García HM, Vallejo Aristizábal VH, De Souza Nogueira C, Veríssimo C, Sartori J, Sartori R, Ferreira JCP. 2017. Thermoregulatory responses of Holstein cows exposed to experimentally induced heat stress. *J Therm Biol*. 66:68–80. doi:10.1016/j.jtherbio.2017.03.014.

Dikmen S, Hansen PJ. 2009. Is the temperature-humidity index the best indicator of heat stress in lactating dairy cows in a subtropical environment? *J Dairy Sci*. 92(1):109–116. doi:10.3168/jds.2008-1370.

[DKPP Jawa Barat] Dinas Ketahanan Pangan dan Peternakan Provinsi Jawa Barat. 2024. Profil Balai Pengembangan Produksi dan Inovasi Bibit Ternak Sapi Perah (BPPIBTSP) Bunikasih. [diakses 2026 Mei 8]. https://dkpp.jabarprov.go.id/bunikasih.

Frei A, Evans N, King G, McAloon C, Viora L. 2022. Associations between cow-level parameters and heart rate variability as a marker of the physiological stress response in dairy cows. *J Dairy Res*. 89(3):265–270. doi:10.1017/S0022029922000565.

Galán E, Llonch P, Villagrá A, Levit H, Pinto S, Del Prado A. 2018. A systematic review of non-productivity-related animal-based indicators of heat stress resilience in dairy cattle. *PLoS One*. 13(11):e0206520. doi:10.1371/journal.pone.0206520.

Gaughan JB, Hahn GL, Mader TL, Eigenberg RA. 2000. Respiration rate: is it a good measure of heat stress in cattle? *Asian-Australas J Anim Sci*. 13(Suppl):329–332.

Giannone C, Bovo M, Ceccarelli M, Torreggiani D, Tassinari P. 2023. Review of the heat stress-induced responses in dairy cattle. *Animals (Basel)*. 13(22):3537. doi:10.3390/ani13223537.

Goodfellow I, Bengio Y, Courville A. 2016. *Deep Learning*. Cambridge (MA): MIT Pr.

Habiba MU, Hoque SAM, Uddin M, Esha KAJ, Seema SZ, Al-Noman KM, Tamanna SN, Akhtar S, Salam MA, Selim ASM, *et al.* 2025. Effect of short duration heat stress on the physiological and production parameters of Holstein-Friesian crossbred dairy cows in Bangladesh. *Climate*. 13(1):18. doi:10.3390/cli13010018.

Hahn GL. 1999. Dynamic responses of cattle to thermal heat loads. *J Anim Sci*. 77(Suppl 2):10–20. doi:10.2527/1997.77suppl_210x.

Han J, Kamber M, Pei J. 2011. *Data Mining: Concepts and Techniques*. Ed ke-3. Waltham (MA): Morgan Kaufmann.

Hinton GE, Nair V. 2010. Rectified linear units improve restricted Boltzmann machines. Di dalam: Fürnkranz J, Joachims T, editor. *Proceedings of the 27th*

IPB University Bogor Indonesia
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.
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University

International Conference on Machine Learning; 2010 Jun 21–24; Haifa, Israel. Madison (WI): Omnipress. hlm 807–814.

Hoffmann G, Herbut P, Pinto S, Heinicke J, Kuhla B, Amon T. 2020. Animal-related, non-invasive indicators for determining heat stress in dairy cows. *Biosyst Eng*. 199:83–96. doi:10.1016/j.biosystemseng.2019.10.017.

Idris M, Uddin J, Sullivan M, McNeill DM, Phillips CJC. 2021. Non-invasive physiological indicators of heat stress in cattle. *Animals (Basel)*. 11(1):71. doi:10.3390/ani11010071.

Islam MA, Lomax S, Doughty A, Islam M, Jay O, Thomson P, Clark CEF. 2021. Automated monitoring of cattle heat stress and its mitigation. *Front Anim Sci*. 2:737213. doi:10.3389/fanim.2021.737213.

Jeelani R, Konwar D, Khan A, Kumar D, Chakraborty D, Brahma B. 2019. Reassessment of temperature-humidity index for measuring heat stress in crossbred dairy cattle of a subtropical region. *J Therm Biol*. 82:99–106. doi:10.1016/j.jtherbio.2019.03.017.

Jo J, Lee HG. 2025. Impact of relative humidity on heat stress responses in early-lactation Holstein cows. *Animals (Basel)*. 15(11):1503. doi:10.3390/ani15111503.

Kadzere CT, Murphy MR, Silanikove N, Maltz E. 2002. Heat stress in lactating dairy cows: a review. *Livest Prod Sci*. 77(1):59–91. doi:10.1016/S0301-6226(01)00330-X.

Kibler HH. 1964. Environmental Physiology and Shelter Engineering. LXVII. Thermal Effects of Various Temperature-Humidity Combinations on Holstein Cattle as Measured by Eight Physiological Responses. Research Bulletin. Columbia (MO): University of Missouri, College of Agriculture, Agricultural Experiment Station.

Kingma DP, Ba J. 2015. Adam: a method for stochastic optimization. Di dalam: *Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR)*; 2015 May 7–9; San Diego (CA), United States.

Kovács L, Jurkovich V, Bakony M, Szenci O, Póti P, Tőzsér J. 2014. Welfare implication of measuring heart rate and heart rate variability in dairy cattle: literature review and conclusions for future research. *Animal*. 8(2):316–330. doi:10.1017/S1751731113002140.

Leondro H, Widyobroto BP, Agus A. 2021. Physiological responses of Holstein Friesian dairy cows raised under tropical conditions in Indonesia. *J Phys Conf Ser*. 1869:012161. doi:10.1088/1742-6596/1869/1/012161.

Li D, Yan G, Li F, Lin H, Jiao H, Han H, Liu W. 2024. Optimized machine learning models for predicting core body temperature in dairy cows: enhancing accuracy and interpretability for practical livestock management. *Animals (Basel)*. 14(18):2724. doi:10.3390/ani14182724.

Mantovani R, Menezes GC, Dórea JRR. 2024. Predicting respiration rate in unrestrained dairy cows using image analysis and fast Fourier transform. *JDS Commun*. 5(3):310–316. doi:10.3168/jdsc.2023-0442.

Montgomery DC, Peck EA, Vining GG. 2021. *Introduction to Linear Regression Analysis*. Ed ke-6. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons.

Montgomery DC, Runger GC. 2018. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Ed ke-7. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons.

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan 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.

Moran J. 2005. *Tropical Dairy Farming: Feeding Management for Smallholder Dairy Farmers in the Humid Tropics*. Collingwood (AU): Landlinks Pr.

Mukaka MM. 2012. Statistics corner: a guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi Med J*. 24(3):69–71.

Mylostyvyi R, Izhboldina O. 2025. An integrated approach using temperature–humidity index, productivity, and welfare indicators for herd-level heat stress assessment in dairy cows. *Animals (Basel)*. 15(22):3341. doi:10.3390/ani15223341.

Oliveira CP, Sousa FC, Silva AL, Schultz ÉB, Valderrama Londoño RI, Souza PAR. 2025. Heat stress in dairy cows: impacts, identification, and mitigation strategies—a review. *Animals (Basel)*. 15(2):249. doi:10.3390/ani15020249.

Pariswara H, Hilmia N, Christi RF. 2021. Korelasi efisiensi reproduksi dan produksi susu sapi perah Friesian Holstein di BPPIBTSP Bunikasih. *Ternak Trop*. 22(2):82–89. doi:10.21776/ub.jtapro.2021.022.02.1.

Pinto S, Hoffmann G, Ammon C, Amon T. 2020. Critical temperature-humidity index thresholds based on the physiological parameters of lactating dairy cows. *J Therm Biol*. 88:102523. doi:10.1016/j.jtherbio.2020.102523.

Prechelt L. 1998. Early stopping—but when? Di dalam: Orr GB, Müller KR, editor. *Neural Networks: Tricks of the Trade*. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 1524. Berlin (DE): Springer. hlm 55–69.

Rebez EB, Sejian V, Silpa MV, Kalaignazhal G, Thirunavukkarasu D, Devaraj C, Nikhil KT, Ninan J, Sahoo A, Lacetera N, *et al.* 2024. Applications of artificial intelligence for heat stress management in ruminant livestock. *Sensors*. 24(18):5890. doi:10.3390/s24185890.

Ruban SY, Borshch OO, Borshch OV, Orischuk O, Balatskiy Y, Fedorchenko M, Kachan A, Zlochevskiy M. 2020. The impact of high temperatures on respiration rate, breathing condition and productivity of dairy cows in different production systems. *Anim Sci Pap Rep*. 38(1):61–72.

Ruchay A, Kober V, Dorofeev K, Kolpakov V, Dzhulamanov K, Kalschikov V, Guo H. 2022. Comparative analysis of machine learning algorithms for predicting live weight of Hereford cows. *Comput Electron Agric*. 195:106837. doi:10.1016/j.compag.2022.106837.

Shu H, Wang W, Guo L, Bindelle J. 2021. Recent advances on early detection of heat strain in dairy cows using animal-based indicators: a review. *Animals (Basel)*. 11(4):980. doi:10.3390/ani11040980.

Shu H, Guo L, Bindelle J, Fang T, Xing M, Sun F, Chen X, Zhang W, Wang W. 2022. Evaluation of environmental and physiological indicators in lactating dairy cows exposed to heat stress. *Int J Biometeorol*. 66(6):1219–1232. doi:10.1007/s00484-022-02270-w.

Shu H, Li Y, Bindelle J, Jin Z, Fang T, Xing M, Guo L, Wang W. 2023. Predicting physiological responses of dairy cows using comprehensive variables. *Comput Electron Agric*. 207:107752. doi:10.1016/j.compag.2023.107752.

Silva AMGC, Pandorfi H, Silva WA, Moraes AS, Pereira HJL, Almeida GLP, Machado NAF, Ferreira MB, Silva MV. 2025. Machine learning models for estimating physiological indicators of thermal stress in Dorper rams in the Brazilian semi-arid region. *Ruminants*. 5(4):61. doi:10.3390/ruminants5040061.

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University

Su J, Kong X, Wang W, Xie Q, Wang C, Tan B, Wang J. 2025. Weaning performance prediction in lactating sows using machine learning for precision nutrition and intelligent feeding. *Anim Nutr*. 21:222–233. doi:10.1016/j.aninu.2025.01.007.

Tresoldi G, Hejazi M, Tucker CB. 2025. A comprehensive study of respiration rates in dairy cattle in a Mediterranean climate. *J Dairy Sci*. 108(6):6229–6243. doi:10.3168/jds.2024-26038.

Wang M, Li S, Peng R, Räisänen S, Serviento A, Sun X, Wang K, Yu F, Niu M. 2024. Learning end-to-end respiratory rate prediction of dairy cows from RGB videos. *J Dairy Sci*. 107(11):9862–9874. doi:10.3168/jds.2023-24601.

West JW. 2003. Effects of heat stress on production in dairy cattle. *J Dairy Sci*. 86(6):2131–2144. doi:10.3168/jds.S0022-0302(03)73803-X.

Willmott CJ, Matsuura K. 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Clim Res*. 30:79–82. doi:10.3354/cr030079.

Yan G, Shi Z, Li H. 2021. Critical temperature-humidity index thresholds based on surface temperature for lactating dairy cows in a temperate climate. *Agriculture (Basel)*. 11(10):970. doi:10.3390/agriculture11100970.

Yan G, Zhao W, Wang C, Shi Z, Li H, Yu Z, Jiao H, Lin H. 2024. A comparative study of machine learning models for respiration rate prediction in dairy cows: exploring algorithms, feature engineering, and model interpretation. *Biosyst Eng*. 239:207–230. doi:10.1016/j.biosystemseng.2024.01.010.

IPB University
Bogor Indonesia
@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.
IPB University
Perpustakaan IPB University