



# **PENDEKATAN REGRESI KONTINUM FUNGSIONAL KEKAR DALAM PEMODELAN KALIBRASI**

**ISMAH**



**PROGRAM STUDI STATISTIKA DAN SAINS DATA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
INSTITUT PERTANIAN BOGOR  
BOGOR  
2024**

## **PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA**

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Pendekatan Regresi Kontinum Fungsional Kekar Dalam Pemodelan Kalibrasi” 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 disertasi ini.

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

Bogor, Agustus Tahun 2024

Ismah  
G161180051

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.



## RINGKASAN

ISMAH. Pendekatan Regresi Kontinum Fungsional Kekar Dalam Pemodelan Kalibrasi. Dibimbing oleh ERFIANI, AJI HAMIM WIGENA, dan BAGUS SARTONO.

Kalibrasi peubah ganda merupakan proses menghubungkan sekumpulan data hasil pengukuran yang relatif mudah dan murah diperoleh dengan sekumpulan data hasil pengukuran yang sukar dan mahal memperolehnya. Tujuan kalibrasi peubah ganda berdasarkan sudut pandang statistika adalah menemukan model  $E(Y) = f(\mathbf{X})$ , untuk prediksi  $Y$  dengan akurasi dan presisi yang tinggi.

Salah satu penerapan kalibrasi dalam bidang kesehatan adalah pemodelan hubungan antara kadar glukosa darah yang diukur dengan teknik invasif dan non-invasif berupa spektrum yang menggambarkan sejauh mana cahaya inframerah atau elektromagnetik diserap oleh molekul-molekul glukosa dalam jaringan kulit. Data ini mencakup informasi tentang intensitas cahaya pada berbagai panjang gelombang. Pola spektrum diharapkan dapat menduga kadar glukosa darah.

Teknik yang digunakan untuk mengukur glukosa darah pada alat non-invasif adalah spektroskopi. Hasil keluaran spektroskopi memungkinkan adanya pergeseran pencaran, karena objek yang sama diukur beberapa kali tidak tepat menghasilkan spektrum yang sama. Ukuran objek memiliki pengaruh yang nyata terhadap spektrum. Spektrum yang keluar sering kali tidak sesuai dengan semestinya, hal ini terjadi karena pencaran cahaya yang disebabkan sifat fisik dan kimiawi dari objek yang diamati. Pengaruh yang muncul akibat sifat fisik dan kimiawi objek dapat menyebabkan penyimpangan cahaya, ketidaklinieran pencaran, dan ketidakkonsistenan respon. Hal inilah yang mendasari dibutuhkan suatu metode prapemrosesan, sehingga diperoleh data yang konsisten dan mulus (*smooth*). Berdasarkan hasil kajian literatur diperoleh metode *Wavelet* menunjukkan hasil pendugaan model yang lebih baik.

Data fungsional muncul sebagai hasil dari pengukuran atau pengamatan dari fenomena yang berubah atau bervariasi sepanjang waktu, ruang, atau dimensi lainnya. Penyebab utama munculnya data fungsional adalah sifat alami dari fenomena atau proses yang diamati seperti pada teknik spektroskopi. Regresi kontinum fungsional (RKF) merupakan pengembangan dari regresi kontinum yang dapat digunakan untuk mengatasi bila jumlah peubah bebas ( $p$ ) lebih besar daripada jumlah amatan ( $p \gg n$ ) dan data berbentuk fungsional. Pengukuran memungkinkan adanya nilai-nilai pencilan (*outlier*) dalam data yang diperoleh, sedangkan RKF berdasarkan kajian simulasi maupun empirik tidak resisten terhadap pencilan, sehingga perlu dikembangkan RKF yang kekar (RKFK).

Performa metode dalam mengatasi  $p \gg n$  dan data fungsional, dalam penelitian ini dieksplorasi terhadap kelima metode yang diklasifikasi menjadi dua bagian, metode fungsional dan non fungsional. Metode fungsional yang diterapkan yaitu RKF yang diterapkan dengan mengkombinasikan *Wavelet* (RKF-*Wavelet*) dan Regresi fungsional (RF), sedangkan metode non fungsional yaitu regresi komponen utama (RKU), regresi kuadrat terkecil parsial (RKTP), dan regresi kuadrat terkecil (RKT). Performa masing-masing metode dikaji menggunakan data simulasi, peubah bebas dibangkitkan dari fungsi sinus yang dikolaborasikan dengan distribusi seragam (*uniform*) dengan  $p = 365$  dan jumlah pengamatan yang beragam

(n) yaitu 50, 100, dan 200. Kelima metode juga dikaji kekekarannya, dengan teknik simulasi data, yang dibangkitkan besar persentase bobot pencilan dari 2% hingga 10%.

Hasil kajian simulasi menunjukkan semakin bertambah jumlah data (n) performa dari kelima metode semakin baik, yang ditunjukkan dengan menurunnya nilai *root mean squares error of prediction* (RMSEP) dan *mean absolute error* (MAE), serta meningkatkan nilai korelasi antara peubah amatan dan peubah dugaan. Analisis secara menyeluruh disimpulkan bahwa RKF-*Wavelet* mempunyai ukuran kebaikan model yang lebih unggul dibandingkan dengan keempat metode lainnya.

Penerapan pendekatan RKF-*Wavelet* pada data pengukuran glukosa darah memberikan hasil RMSEP 86,57, korelasi 0,1718, MAE 58,11, dan *mean absolute percentage error* (MAPE) 41,48. Nilai yang diperoleh lebih kecil dibandingkan dengan RF, RKU, RKTP dan RKT.

RKFK yang dikembangkan dievaluasi menggunakan data simulasi dan diperoleh ukuran kebaikan model yang lebih baik dibandingkan kelima metode RKF, RF, RKU, RKTP, dan RKT. Penerapan RKFK pada data pengukuran glukosa darah, diperoleh hasil RMSEP 33,25, korelasi 0,92, MAE 16,36, dan MAPE 15,01, nilai-nilai tersebut lebih baik dibandingkan dengan kelima metode lainnya.

Performa RKFK tergantung pada fungsi pembobotan yang dipilih, sehingga dalam penelitian ini dilakukan analisis terhadap RKFK dengan empat fungsi pembobot yang umum digunakan adalah Huber, Hampel, Ramsay, dan Tukey (*Bisquare*). Analisis dilakukan dengan mengkaji pada data simulasi dan empirik, dan diperoleh hasil RKFK dengan fungsi pembobot Huber menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan dengan tiga fungsi pembobot lainnya.

Kata kunci: kalibrasi, regresi fungsional, regresi kontinum fungsional, regresi kontinum kekar





## SUMMARY

ISMAH. Robust Functional Continuum Regression Approach in Calibration Modelling. Supervised by ERFIANI, AJI HAMIM WIGENA, and BAGUS SARTONO.

Multiple variable calibration is the process of correlating a set of measurement data that is relatively easy and cheap to obtain with a set of measurement data that is difficult and expensive to obtain. The goal of multiple variable calibration from a statistical point of view is to find a model  $E(Y) = f(\mathbf{X})$ , to predict  $Y$  with high accuracy and precision.

One application of calibration in healthcare is modeling the relationship between blood glucose levels measured by invasive and non-invasive techniques in the form of spectra that describe the extent to which infrared or electromagnetic light is absorbed by glucose molecules in skin tissue. This data includes information about the intensity of light at various wavelengths. The spectrum pattern is expected to predict blood glucose levels.

The technique used to measure blood glucose in non-invasive devices is spectroscopy. The output of spectroscopy allows for a shift in scatter, as the same object measured several times does not exactly produce the same spectrum. The size of the object has a noticeable influence on the spectrum. The spectra that come out are often not what they should be, this occurs due to the scattering of light caused by the physical and chemical properties of the object being observed. Influences that arise due to the physical and chemical properties of the object can cause light deviation, nonlinearity of scattering, and inconsistency of response. This is what underlies the need for a preprocessing method, so that consistent and smooth data is obtained. Based on the results of the literature review, the Wavelet method shows better model estimation results.

Functional data arises as a result of measurements or observations of phenomena that change or vary over time, space, or other dimensions. The main reason for the emergence of functional data is the nature of the observed phenomenon or process such as in spectroscopy techniques. Continuum functional regression (RKF) is an extension of continuum regression that can be used to cope when the number of independent variables ( $p$ ) is greater than the number of observations ( $p \gg n$ ) and the data is functional. Measurement allows the presence of outlier values in the data obtained, while RKF based on simulation and empirical studies is not resistant to outliers, so it is necessary to develop a robust RKF (RKFK).

The performance of the methods in dealing with  $p \gg n$  and functional data, in this study explored the five methods classified into two parts, functional and non-functional methods. The functional methods applied are RKF by combining Wavelet (RKF-Wavelet) and functional regression (RF), while the non-functional methods are principal component regression (RKU), partial least squares regression (RKTP), and least squares regression (RKT). The performance of each method is studied using simulated data, the independent variable is generated from a sinus function collaborated with a uniform distribution with  $p = 365$  and a varying number of observations ( $n$ ) of 50, 100, and 200. The five methods are also studied



for robustness, with data simulation techniques, which are generated with a large percentage of outlier weights from 2% to 10%.

The results of the simulation study showed that as the number of data ( $n$ ) increased, the performance of the five methods improved, as indicated by decreasing the root mean squares error of prediction (RMSEP) and mean absolute error (MAE) values, as well as increasing the correlation value between observed variables and predicted variables. Overall analysis concluded that RKF-Wavelet has a superior measure of model goodness compared to the other four methods.

The application of the RKF-Wavelet approach to blood glucose measurement data gives the results of RMSEP 86.57, correlation 0.1718, MAE 58.11, and mean absolute percentage error (MAPE) 41.48. The values obtained are smaller than those of RF, RKU, RKTP and RKT.

The developed RKFK was evaluated using simulated data and obtained a better measure of model goodness than the five methods RKF, RF, RKU, RKTP, and RKT. Application of RKFK on blood glucose measurement data, the results obtained RMSEP 33.25, correlation 0.92, MAE 16.36, and MAPE 15.01, these values are better than the other five methods.

The performance of RKFK depends on the chosen weighting function, so in this study, an analysis of RKFK with four commonly used weighting functions is conducted, namely Huber, Hampel, Ramsay, and Tukey (*Bisquare*). The analysis was carried out by examining simulated and empirical data, and the results obtained from RKFK with the Huber weighting function showed better performance compared to the other three weighting functions.

**Keywords:** calibration, functional regression, functional continuum regression, robust continuum regression.





@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.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2024  
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.*

# **PENDEKATAN REGRESI KONTINUM FUNGSIONAL KEKAR DALAM PEMODELAN KALIBRASI**

**ISMAH**

Disertasi  
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar  
Doktor pada  
Program Studi Statistika dan Sains Data

**PROGRAM STUDI STATISTIKA DAN SAINS DATA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
INSTITUT PERTANIAN BOGOR  
BOGOR  
2024**

*@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.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Dr. Farit Mochamad Afendi, M.Si
- 2 Dr. Agus Mohamad Soleh, S.Si, M.T

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Dr. Farit Mochamad Afendi, M.Si
- 2 Prof. Dr. Ma'mun Murod, S.Sos., M.Si 

**Judul Disertasi: Pendekatan Regresi Kontinum Fungsional Kekar dalam  
Pemodelan Kalibrasi**

**Nama : Ismah**  
**NIM : G161180051**

**Disetujui oleh**

**Pembimbing 1:**  
**Dr. Ir. Erfiani, M.Si** \_\_\_\_\_

**Pembimbing 2:**  
**Prof. Dr. Ir. Aji Hamim Wigena, M.Sc** \_\_\_\_\_

**Pembimbing 3:**  
**Dr. Bagus Sartono, M.Si** \_\_\_\_\_

**Diketahui oleh**

**Ketua Program Studi:**  
**Dr. Anang Kurnia, S.Si., M.Si** \_\_\_\_\_  
**NIP. 197308241997021001**

**Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan  
Alam :**  
**Dr. Berry Juliandi, S.Si., M.Si** \_\_\_\_\_  
**NIP. 197807232007011001**

**Tanggal Ujian: 26 Juni 2024**

**Tanggal Lulus:**

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.



## 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 Oktober 2021 sampai bulan Juni 2024 ini ialah pemodelan kalibrasi, dengan judul “Pendekatan Regresi Kontinum Fungsional Kekar Dalam Pemodelan Kalibrasi”.

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing, Dr. Erfiani, M.Si, Prof. Dr. Aji Hamim Wigena, M.Sc, dan Dr. Bagus Sartono, M.Si yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Bapak Dr. Anang Kurnia, M.Si selaku Ketua Program Studi, dan penguji luar komisi pembimbing Dr. Farit Mochamad Afendi, M.Si dan Dr. Agus Mohamad Soleh, S.Si., M.T, yang telah memberikan saran dan masukan dalam ujian tertutup penulis.

Ungkapan terima kasih kepada Bapak Dr. Ir. Setiawan, MS dari Institut Teknologi Sepuluh November (ITS) yang telah berkenan memberikan pemahaman tentang regresi kontinum, Dr. Renan Prasta Jenie, STP. MT dari Universitas Binawan sekaligus alumni IPB, dan Umam Hidayaturrohman, S.Stat., M.Si yang menjadi anggota pengembang alat glukosa darah noninvasif, yang telah berkenan memberikan informasi tentang data glukosa darah non invasif. Dr. Faisal, M.Si dari Universitas Bina Nusantara yang telah membantu memahami mengenai teori dengan pendekatan analisis real.

Di samping itu, sebagai bentuk penghargaan penulis tujukan kepada Rektor Universitas Muhammadiyah Jakarta (Prof. Dr. Ma'mun Murod, M.Si) beserta jajaran Wakil Rektor, Dekan Fakultas Ilmu Pendidikan UMJ (Prof. Dr. Iswan, M.Si) beserta jajaran Wakil Dekan dan Kaprodi, Direktur Pascasarjana UMJ (Prof. Dr. Herwina Bahar, MA), rekan-rekan Dosen Prodi Pendidikan Matematika (Bu Mita, Bu Hastri, Bu Viarti, Bu Arlin, dan Bu Ririn), serta Bapak Ibu dosen Fakultas Ilmu Pendidikan UMJ.

Ungkapan terima kasih yang tak terhingga, atas do'a dan dukungan teruntuk ayahanda terhormat (alm. Muhammad Hasyim), ibunda terkasih (alm. Maisaroh), Ibu dan Bapak mertua (Hj. Endeh Sumarni, S.Ag, dan Drs. Abdul Rozak), suami tercinta (Muhamad Farid Fachrurozi, S.Si, M.Pd), anak-anak tersayang (Rafa Mumtaz Aljabbar, Lathifah Aulia Zahwa, dan Alea Nisa Jameela), serta seluruh keluarga besar. Teman-teman STK 2018 (Mba Tonah, Mba vera, Mba Rini, Mba Femmy, Mba Ita, Mba Yenni, Bu Viarti, Mas Hengki dan Mba Dila), dan keluarga besar Pascasarjana STK IPB, terima kasih untuk dukungan dan telah berkenan menjadi tempat diskusi serta sharing pengetahuan.

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

Bogor, Agustus 2024

*Ismah*

## DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan	5
1.4 Manfaat	6
1.5 Ruang Lingkup	6
1.6 Kebaruan ( <i>novelty</i> )	7
II TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1 Sistem Non-Invasif untuk Pengukuran Glukosa Darah	10
2.2 Transformasi <i>Wavelet</i>	12
2.3 Transformasi <i>Wavelet</i> Kontinu	14
2.4 Regresi Fungsional	15
2.5 Regresi Kontinum	16
2.6 Regresi Kontinum Fungsional	17
2.7 Fungsi Pembobot	18
III PENDEKATAN REGRESI KONTINUM FUNGSIONAL PADA DATA HASIL TRANSFORMASI WAVELET DALAM MODEL KALIBRASI PENGUKURAN GLUKOSA NON-INVASIF	21
3.1 Pendahuluan	21
3.2 Peringkasan Data	22
3.3 Eksplorasi Data	23
3.4 Peringkasan Data	26
3.5 Pemodelan Kalibrasi Glukosa Darah Non-Invasif	26
3.6 Kesimpulan	29
IV KAJIAN KEKEKARAN BERBAGAI METODE PEMODELAN KALIBRASI	30
4.1 Pendahuluan	30
4.2 Analisis Kekekaran Berbagai Metode Pemodelan Kalibrasi	31
4.3 Kesimpulan	35
V PENGEMBANGAN METODE REGRESI KONTINUM FUNGSIONAL KEKAR	36
5.1 Pendahuluan	36
5.2 Kajian Teoritis	37
5.3 Usulan Metodologi (Kebaruan)	40
5.4 Evaluasi Kinerja Metodologi yang Diusulkan	41
5.5 Ilustrasi Data Empirik	47
5.6 Kesimpulan	49
VI PERFORMA ANALISIS FUNGSI PEMBOBOT PADA REGRESI KONTINUM FUNGSIONAL KEKAR	50



6.1	Pendahuluan	50
6.2	Metode	51
6.3	Hasil dan Pembahasan	51
VII PEMBAHASAN UMUM		57
VIII SIMPULAN DAN SARAN		63
8.1	Simpulan	63
8.2	Saran	63
DAFTAR PUSTAKA		65
LAMPIRAN		70
RIWAYAT HIDUP		89

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.