



I-OPTIMAL SATURATED DESIGN DENGAN MODIFIED FEDOROV'S EXCHANGE ALGORITHM

RAKESHA PUTRA ANTIQUE YUSUF



**PROGRAM STUDI SARJANA STATISTIKA DAN SAINS DATA
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

- 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

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.



PERNYATAAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul “*I-Optimal Saturated Design* dengan *Modified Fedorov’s Exchange Algorithm*” 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 skripsi ini.

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

Bogor, Juni 2026

Rakesha Putra Antique Yusuf
NIM. G1401221056



ABSTRAK

RAKESHA PUTRA ANTIQUE YUSUF. *I-Optimal Saturated Design* dengan *Modified Fedorov's Exchange Algorithm*. Dibimbing oleh SACHNAZ DESTA OKTARINA dan UTAMI DYAH SYAFITRI.

Tingginya biaya operasional eksperimen menuntut efisiensi melalui *saturated design*, di mana jumlah satuan percobaan sama dengan parameter model. Terdapat dua tujuan dalam regresi, yaitu pendugaan parameter dan pendugaan ragam prediksi. Penelitian ini bertujuan untuk mencari rancangan yang optimal dari aspek pendugaan ragam prediksi namun dengan jumlah *runs* yang sama dengan jumlah parameter model dengan *I-Optimality Criterion*. Untuk mendapatkan rancangan tersebut digunakan *Modified Fedorov's Exchange Algorithm* yang merupakan salah satu dari *point exchange algorithm* yang membutuhkan *candidate set*. Penelitian ini akan digunakan tiga *candidate set*, yaitu *Central Composite Design* (CCD), titik titik dalam daerah percobaan dari rancangan faktorial, dan gabungan, dievaluasi berdasarkan nilai *I-Optimality Criterion* dan *I-Efficiency*. Untuk menghindari singularitas matriks dalam perhitungan *I-Optimality Criterion* ditambahkan regularisasi λ . *I-Optimal Saturated Design* untuk dua faktor dengan *candidate set* gabungan diperoleh 6 titik rancangan dengan *I-Optimality Criterion* terendah sebesar 0,7361. Dibandingkan dengan *candidate set* CCD, maka rancangan tersebut mempunyai *I-Efficiency* sebesar 106,75%. Pada rancangan *I-Optimal Design* untuk 3 faktor diperoleh juga *candidate set* gabungan memiliki *I-Optimality Criterion* terendah sebesar 1,3866 dengan 10 titik rancangan dan *I-Efficiency* mencapai 115,54% terhadap rancangan CCD.

Kata kunci: *saturated design, I-optimality criterion, I-optimal saturated design, modified fedorov algorithm.*

@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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

ABSTRACT

RAKESHA PUTRA ANTIQUE YUSUF. *I-Optimal Saturated Design with Modified Fedorov's Exchange Algorithm*. Supervised by SACHNAZ DESTA OKTARINA and UTAMI DYAH SYAFITRI.

High operational costs in experiments demand efficiency through a saturated design, where the number of experimental runs equals the model parameters. Regression has two main objectives: parameter estimation and prediction variance estimation. This study aims to find an optimal design focusing on the prediction variance estimation, with a number of runs exactly equal to the number of model parameters, using the I-Optimality Criterion. To obtain this design, the Modified Fedorov's Exchange Algorithm was used, which is a point exchange algorithm that requires a candidate set. This research utilizes three candidate sets—Central Composite Design (CCD), factorial, and a combined set—which are evaluated based on their I-Optimality Criterion and I-Efficiency values. To avoid matrix singularity in calculating the I-Optimality Criterion, a regularization λ is added. The I-Optimal Design for two factors using the combined candidate set yielded 6 design points with the lowest I-Optimality Criterion of 0.7361. Compared to the CCD candidate set, this design achieved the I-Efficiency of 106.76%. Similarly, for the 3-factor I-Optimal Design, the combined candidate set also achieved the lowest I-Optimality Criterion of 1.3866 with 10 design points, and an I-Efficiency reaching 115.54% relative to the CCD design.

Keywords: saturated design, I-optimality criterion, I-optimal saturated design, modified fedorov algorithm.



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 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.



@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.



I-OPTIMAL SATURATED DESIGN DENGAN MODIFIED FEDOROV'S EXCHANGE ALGORITHM

RAKESHA PUTRA ANTIQUE YUSUF

Skripsi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana pada
Program Studi Statistika dan Sains Data

**PROGRAM STUDI SARJANA STATISTIKA DAN SAINS DATA
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

- 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

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.

Tim Penguji pada Ujian Skripsi:
1 Eka Putri Nur Utami, S.Stat., M.Si.



@Hak cipta milik IPB University

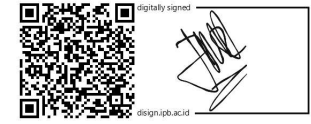
IPB University

Judul Skripsi : *I-Optimal Saturated Design dengan Modified Fedorov's Exchange Algorithm*

Nama : Rakesha Putra Antique Yusuf
NIM : G1401221056

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Sachnaz Desta Oktarina, S.Stat., M.Agr.,
Ph.D

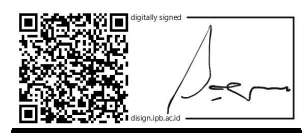


Pembimbing 2:
Dr. Utami Dyah Syafitri, S.Si., M.Si.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Dr. Bagus Sartono, S.Si., M.Si.
NIP 197804112005011002



Tanggal Ujian:
9 Juni 2026

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 September 2025 sampai bulan Juni 2026 ini ialah *Optimal Saturated Design*, dengan judul "*I-Optimal Saturated Design* dengan *Modified Fedorov's Exchange Algorithm*". Pada proses pembuatan karya ilmiah ini, penulis banyak mendapatkan doa, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada:

1. Ibu Sachnaz Desta Oktarina S.Stat., M.Agr., Ph.D. dan Ibu Dr. Utami Dyah Syafitri, S.Si., M.Si. selaku komisi pembimbing yang selalu memberikan semangat, nasihat, arahan, dan waktunya tidak hanya dalam pembuatan karya ilmiah, tetapi juga dalam berbagai tahapan kehidupan penulis ketika menempuh pendidikan di Institut Pertanian Bogor.
2. Ibu Eka Putri Nur Utami, S.Stat., M.Si. selaku dosen penguji skripsi yang telah memberikan masukan dan saran dalam memperbaiki karya ilmiah.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. I Made Sumertajaya, M.Si selaku moderator Kolokium dan Bapak La Ode Abdul Rahman, S.Si., M.Si selaku moderator Seminar Hasil yang turut memberikan masukan untuk perbaikan karya ilmiah ini.
4. Ibu Yustiana Sudrajat, Bapak Enrique L. Yusuf selaku orang tua dan seluruh keluarga besar yang telah memberi doa, dukungan, serta motivasinya.
5. Muhammad Dzakwan Alifi, Bulan Cahyani Suhaeri, Fayra Sabrina Madjid, Dewi Muliani, dan Desita Putri Kinanthi, selaku bagian dari Badan Pengurus Harian GSB IPB yang telah memberikan waktu, tenaga, serta cerita yang sangat berarti kepada penulis selama proses studi dan setelahnya.
6. Seluruh Pimpinan dan *Specialist* GSB IPB 2024/2025 yang telah percaya untuk turut membantu dan meluangkan segala hal, yang dikorbankan untuk berjuang bersama dengan arahan penulis selama satu tahun kabinet.
7. Suraption Fams dan Marinestic Statistika 59 yang telah menemani dan memberi semangat selama penyusunan karya ilmiah ini.

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

Bogor, Juni 2026

Rakesha Putra Antique Yusuf



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xi
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	3
TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 <i>Saturated Design</i>	4
2.2 <i>Central Composite Design</i>	4
2.3 <i>Optimal Design</i>	5
2.4 <i>I-Optimality Criterion dan I-Efficiency</i>	5
2.5 <i>Modified Fedorov's Exchange Algorithm</i>	7
III METODE	9
3.1 Pembentukan Rancangan	9
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	11
4.1 Pembentukan <i>Saturated Design</i> Terbaik 2 Faktor	11
4.2 Pembentukan <i>Saturated Design</i> Terbaik 3 Faktor	20
V SIMPULAN DAN SARAN	30
5.1 Simpulan	30
5.2 Saran	30
DAFTAR PUSTAKA	31
LAMPIRAN	33
RIWAYAT HIDUP	61

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

DAFTAR TABEL

1	Ringkasan nilai <i>I-Efficiency</i> hasil rancangan 6 titik rancangan dua faktor	19
2	Ringkasan nilai <i>I-Efficiency</i> hasil rancangan 6 titik rancangan	19
3	Ringkasan nilai <i>I-Optimality Criterion</i> 6 titik rancangan Thoriq (2025)	19
4	Ringkasan nilai <i>I-Efficiency</i> hasil rancangan 10 titik rancangan tiga faktor	27

DAFTAR GAMBAR

1	Rancangan terbaik dari C1	15
2	Rancangan terbaik dari C2	15
3	Rancangan pembandingan C2	16
4	Rancangan terbaik dari C3	16
5	Rancangan pembandingan C3	17
6	Konvergensi algoritma	18
7	<i>I-Optimality Criterion</i> pada 1.000 pengulangan algoritma pada <i>candidate set</i> rancangan dua faktor	18
8	Rancangan terbaik <i>D-Optimal Design</i> Thoriq (2025)	20
9	Rancangan terbaik dari C4	24
10	Rancangan terbaik dari C5	25
11	Rancangan terbaik dari C6	25
12	<i>I-Optimality Criterion</i> pada 1.000 pengulangan algoritma pada <i>candidate set</i> rancangan tiga faktor	26
13	<i>I-Optimality Criterion</i> pada 1.000 <i>random restarts</i>	26

DAFTAR LAMPIRAN

1	<i>Syntax</i> pembentukan <i>I-optimal saturated design</i> 2 faktor	34
2	<i>Syntax</i> visualisasi konvergensi <i>Modified Fedorov's Algorithm</i> , 1.000 <i>random restarts</i> , dan rancangan terbaik <i>saturated design</i> CCD 2 faktor	39
3	<i>Syntax</i> visualisasi 1.000 <i>random restarts</i> dan rancangan terbaik <i>saturated design</i> titik titik dalam daerah percobaan dari rancangan faktorial 2 faktor	41
4	<i>Syntax</i> visualisasi konvergensi <i>Modified Fedorov's Algorithm</i> , 1.000 <i>random restarts</i> , dan rancangan terbaik <i>saturated design</i> gabungan 2 faktor	43
5	<i>Syntax</i> pembentukan <i>I-optimal saturated design</i> 3 faktor	45
6	<i>Syntax</i> visualisasi 1.000 <i>random restarts</i> , dan rancangan terbaik <i>saturated design</i> CCD 3 faktor	50



7	<i>Syntax</i> visualisasi 1.000 <i>random restarts</i> dan rancangan terbaik <i>saturated design</i> titik titik dalam daerah percobaan dari rancangan faktorial 3 faktor	52
8	<i>Syntax</i> visualisasi 1.000 <i>random restarts</i> , dan rancangan terbaik <i>saturated design</i> gabungan 3 faktor	53
9	<i>Syntax</i> perhitungan <i>I-Efficiency</i>	54
10	<i>Syntax</i> visualisasi <i>box plot</i> perbandingan 1.000 <i>random restarts</i> antar <i>candidate set</i> dua faktor	59
11	<i>Syntax</i> visualisasi <i>box plot</i> perbandingan 1.000 <i>random restarts</i> antar <i>candidate set</i> tiga faktor	60

Hak Cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

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

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

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