Optimasi Produksi Tanaman Pangan dengan Pendekatan Program Kuadratik melalui Metode Fungsi Penalti Eksterior (Studi Kasus: Food Estate Humbang Hasundutan)

Demak Rotua Simamora[1*], Lasker Pangarapan Sinaga[2]
[1,2] Matematika, Universitas Negeri Medan, Kota Medan, 20221, Indonesia
*Corresponding Author: demakrotuasimamora@gmail.com

Abstrak

Sektor pertanian memiliki peran penting dalam mendukung ketahanan pangan nasional, sehingga peningkatan efisiensi produksi menjadi hal yang krusial. Salah satu faktor yang menentukan keberhasilan produksi tanaman pangan adalah pengalokasian lahan secara optimal dan efisien. Pengelolaan lahan yang tidak optimal dapat menyebabkan ketidakseimbangan antara kebutuhan dan kapasitas produksi, sehingga hasil panen tidak maksimal. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan matematis yang mampu memberikan solusi optimal dalam pemanfaatan lahan. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan membangun model optimasi produksi tanaman pangan menggunakan pendekatan program kuadratik di kawasan Food Estate Humbang Hasundutan. Fungsi tujuan dirumuskan dalam bentuk kuadratik dengan kendala linier berdasarkan data historis luas lahan tanam dan rata-rata produksi lima komoditas tanaman, yaitu kentang, bawang merah, cabai, kubis, dan jagung. Penyelesaian model optimasi dilakukan dengan metode fungsi penalti eksterior, yaitu suatu pendekatan numerik yang mengubah permasalahan optimasi berkendala menjadi tanpa kendala dengan menambahkan penalti terhadap pelanggaran kendala ke dalam fungsi tujuan. Hasil simulasi menunjukkan alokasi lahan optimal sebesar 72,6405 ha kentang, 116,8751 ha bawang merah, 18,5918 ha cabai, 39,2192 ha kubis, 56,8118 ha jagung dengan total produksi mencapai 61802,2146 ton. Model ini dapat menjadi dasar pengambilan keputusan strategis dalam perencanaan dan pengelolaan lahan pertanian guna meningkatkan hasil produksi tanaman.
Kata kunci: Metode Fungsi Penalti Eksterior; Optimasi; Program Kuadratik

Abstract

The agricultural sector has an important role in supporting national food security, so increasing production efficiency becomes crucial. One of the factors that determines the success of food crop production is the optimal and efficient allocation of land. Non-optimal land management can cause an imbalance between needs and production capacity, so that harvest yields are not maximal. Therefore, a mathematical approach is needed that is capable of providing optimal solutions in land utilization. Based on this, this research aims to build a food crop production optimization model using a quadratic programming approach in the Humbang Hasundutan Food Estate area. The objective function is formulated in quadratic form with linear constraints based on historical data of planted land area and average production of five crop commodities, namely potatoes, shallots, chilies, cabbage, and corn. The solution of the optimization model is carried out using the exterior penalty function method, which is a numerical approach that transforms a constrained optimization problem into an unconstrained one by adding a penalty for constraint violations into the objective function. Simulation results show an optimal land allocation of 72.6405 ha of potatoes, 116.8751 ha of shallots, 18.5918 ha of chilies, 39.2192 ha of cabbage, 56.8118 ha of corn with a total production reaching 61802.2146 tons. This model can become a basis for strategic decision-making in agricultural land planning and management to increase crop production yields.
Keywords: Exterior Penalty Function Method, Optinization, Quadratic Programming

Citation: Simamora, D. R., & Sinaga, L.P. (2025). Optimasi Produksi Tanaman Pangan dengan Pendekatan Program Kuadratik melalui Metode Fungsi Penalti Eksterior (Studi Kasus: Food Estate Humbang Hasundutan). *Prodising Seminar Nasional Jurusan Matematika 2025*. 282 – 287

PENDAHULUAN

Krisis pangan menjadi isu global yang semakin mengkhawatirkan, terutama bagi negara dengan jumlah penduduk yang besar seperti Indonesia (Afandi, 2024). Berdasarkan informasi dari badan *Food and Agriculture Organization* (FAO), pandemi Covid-19 berpotensi memberikan dampak buruk terhadap ketahanan pangan global dan terdapat sekitar 820 juta orang mengalami kekurangan pangan sebelum pandemi, serta krisis pangan diperkirakan akan melanda dunia dalam 50 tahun ke depan yang dipicu oleh dampak jangka panjang dari pandemi Covid-19 Untuk menghadapi ancaman ini, diperlukan langkah strategis dari pemerintah untuk meningkatkan produksi pangan dalam negeri secara berkelanjutan guna memastikan stabilitas pasokan dan cadangan pangan nasional.

Sebagai langkah strategis dalam meningkatkan ketahanan pangan, Pemerintah mengembangkan kebijakan kawasan sentra produksi pangan atau yang dikenal sebagai Food Estate. Program ini bertujuan untuk menciptakan kawasan pertanian terpadu dengan skala besar untuk memastikan ketersediaan pangan dalam negeri di tengah tantangan perubahan iklim dan keterbatasan sumber daya. Salah satu lokasi pengembangan kawasan Food Estate berada di Provinsi

© Jurusan Matematika - Universitas Negeri Medan

Sumatera Utara adalah di Kabupaten Humbang Hasundutan. Kawasan ini memiliki lahan seluas 1000 hektar yang difokuskan pada pengembangan tanaman pangan seperti kentang, bawang merah, cabai, kubis, dan jagung.

Program Food Estate memiliki potensi dalam meningkatkan produksi pangan, namun efektivitasnya masih menghadapi tantangan dalam pengelolaan sumber daya, terutama dalam alokasi lahan yang terbatas. Ketersediaan lahan merupakan salah satu faktor utama yang menentukan tingkat produktivitas dan tidak seperti faktor lain yang dapat disesuaikan dalam jangka pendek. Ketersediaan lahan merupakan kendala tetap yang tidak dapat diperluas dengan mudah. Apabila alokasi lahan tidak optimal, dapat menyebabkan terjadinya ketidakseimbangan produksi yang berdampak pada penurunan hasil panen. Oleh karena itu, diperlukan strategi optimasi berbasis matematis untuk menentukan alokasi lahan yang efisien, sehingga produktivitas dapat ditingkatkan tanpa perluasan lahan tambahan.

Pendekatan program kuadratik menjadi salah satu metode matematis yang relevan digunakan dalam permasalahan ini. Program kuadratik merupakan suatu pendekatan dalam masalah optimasi di mana fungsi tujuan berupa fungsi nonlinier dan fungsi kendalanya berupa fungsi linier (Fitri & Helma, 2023). Program kuadratik dapat menangkap hubungan nonlinier dan memberikan solusi optimasi yang lebih akurat. Beberapa penelitian terdahulu telah membuktikan keberhasilan penerapan program kuadratik dalam menyelesaikan berbagai permasalahan, seperti penelitian yang dilakukan oleh Feng et al. (2017) untuk mengoptimalkan operasi pembangkit listrik tenaga air guna meminimalkan defisit energi. Penelitian lainnya dilakukan oleh Insani & Sari (2017) untuk memaksimalkan produksi tanaman pangan di kota Magelang dengan kendala luas lahan. Penelitian ini menunjukkan bahwa metode Wolfe dan metode fungsi penalti eksterior mampu memberikan solusi optimal dan efektif untuk mengatasi keterbatasan sumber daya dalam sektor pertanian.

Model program kuadratik dalam penelitian ini akan diselesaikan menggunakan metode fungsi penalti eksterior. Metode fungsi penalti eksterior yang merupakan teknik numerik yang mengubah masalah optimasi dengan kendala menjadi masalah tanpa kendala dengan menambah fungsi penalti pada fungsi objektif (Safani & Sari, 2020). Metode ini memungkinkan solusi optimal tetap memenuhi kendala yang ditetapkan, sehingga alokasi lahan yang dihasilkan dapat lebih efisien sesuai dengan keterbatasan yang ada. Berdasarkan uraian di atas, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan model optimasi produksi tanaman pangan di kawasan Food Estate Humbang Hasundutan menggunakan pendekatan program kuadratik dan menggunakan metode fungsi penalti eksterior untuk menyelesaikannya. Adapun manfaat dari penelitian ini adalah untuk memberikan alternatif solusi matematis yang efisien dan aplikasif dalam mendukung pengelolaan lahan pertanian yang optimal, serta berkontribusi pada pencapaian ketahanan pangan nasional secara berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian terapan dengan variabel bebasnya adalah luas lahan tanam komoditas kentang, bawang merah, cabai, kubis, jagung, dan variabel terikatnya adalah rata-rata produksi dari setiap komoditas tanaman. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data yang diperoleh dari pihak pengelola Food Estate Humbang Hasundutan dari tahun 2021 sampai 2024. Adapun prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini diawali; (1) mengidentifikasi masalah; (2) mengumpulkan data; (3) mengidentifikasi variabel dan parameter model; (3) menyusun model optimasi program kuadratik dengan fungsi tujuan berupa fungsi kuadratik dan fungsi kendala berupa fungsi linier; (4) transformasi model dengan metode fungsi penalti eksterior; (5) proses iterasi dan penyelesaian model; (6) menyelidiki karakteristik solusi optimal; (7) menarik kesimpulan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini akan dibangun model optimasi produksi tanaman pangan pada kawasan Food Estate Humbang Hasundutan dengan menggunakan pendekatan program kuadratik. Model ini dirancang untuk menentukan alokasi lahan yang optimal bagi setiap komoditas tanaman agar total produksi yang dihasilkan dapat dimaksimalkan dengan tetap memperhatikan keterbatasan sumber daya yang tersedia. Dalam membangun model optimasi, langkah awal yang dilakukan adalah mengumpulkan data luas lahan dan rata-rata hasil produksi dari setiap komoditas yang dikembangkan pada kawasan Food Estate. Data ini menjadi dasar dalam proses estimasi parameter fungsi produksi kuadratik. Setiap komoditas memiliki karakteristik produksi yang berbeda, sehingga informasi ini penting untuk menggambarkan hubungan antara luas lahan dan hasil produksi secara matematis. Adapun data yang dimaksud disajikan pada tabel berikut ini untuk merepresentasikan kondisi produktivitas tanaman dalam kurung waktu empat tahun terakhir

(Tabel 1). Berdasarkan data luas lahan tanam dan rata-rata produksi komoditas kentang, bawang merah, cabai, kubis, dan jagung pada tahun 2021-2024 akan dibentuk fungsi tujuan dan kendala yang diformulasikan sebagai berikut:

$$\max f(x) = f_1(x_1) + f_2(x_2) + f_3(x_3) + f_4(x_4) + f_5(x_5) \quad (1)$$

Tabel 1. Data LLT dan RRP di Food Estate Humbang Hasundutan Tahun 2021-2024 (Pengelola Food Estate, 2025).

Tahun	Kentang (LLT)	Kentang (RRP)	Bawang Merah (LLT)	Bawang Merah (RRP)	Cabai (LLT)	Cabai (RRP)	Kubis (LLT)	Kubis (RRP)	Jagung (LLT)	Jagung (RRP)
2021	73,01	6,69	118,83	1,21	7,1	18,75	7,16	15,47	37,36	1,61
2022	30,59	10,92	16,62	2,58	13,97	13,13	20,89	20,06	57,91	1,64
2023	15,05	8,88	6,21	4,33	10,98	5,49	28,3	21,98	49,17	2,17
2024	32,55	7,07	12,33	4,11	18,14	1,22	40,46	11,53	28,22	1,18

NB: LLT = Luas Lahan Tanam; RRP = Rata-rata Produksi

Dengan masing-masing fungsi produksi $f_i(x_i) = a_1 x_i^2 + a_2 x_i + a_3$, dimana *i* = {1, 2, 3, 4, 5). Adapun batasan dalam model ini dirumuskan $0 \leq x_i \leq X_i$. dengan x_i adalah luas lahan yang dialokasikan untuk setiap komoditas tanaman ke$-i$. Sedangkan a_1, a_2, a_3 adalah parameter fungsi kuadratik yang ditentukan berdasarkan data historis luas lahan tanam dan rata-rata produksi untuk masing-masing komoditas. X_i merepresentasikan batas maksimum lahan yang dapat dialokasikan untuk setiap komoditas tanaman ke$-i$. Nilai X_i ditentukan sesuai data historis. Kendala negatif tidak diberlakukan karena tidak memungkinkan alokasi lahan bernilai negatif.

Dalam membangun fungsi tujuan, estimasi parameter dilakukan menggunakan metode kuadrat terkecil. Setelah diperoleh hasil estimasi parameter dari masing-masing komoditas, maka dapat dibentuk fungsi kuadratik yang merepresentasikan hubungan antara luas lahan dan hasil produksi. Fungsi ini akan digunakan sebagai bagian dari fungsi tujuan dalam model optimasi. Maka, bentuk eksplisit fungsi produksi berdasarkan hasil estimasi parameter untuk setiap komoditas adalah:

$$f_1(x_1) = -1{,}5519x_1^2 + 0{,}07513x_1 + 1{,}1639 \quad (2a)$$
$$f_2(x_2) = -3{,}3005x_2^2 + 4{,}0736x_2 + 2{,}4753 \quad (2b)$$
$$f_3(x_3) = -1{,}3744x_3^2 + 0{,}3457x_3 + 1{,}0308 \quad (2c)$$
$$f_4(x_4) = -3{,}3194x_4^2 + 0{,}0844x_4 + 0{,}2395 \quad (2d)$$
$$f_5(x_5) = -0{,}8537x_5^2 + 0{,}5319x_5 + 0{,}6402 \quad (2e)$$

Dengan diketahui fungsi $f_i(x_i)$, maka fungsi tujuan $f(x)$ dalam model optimasi program kuadratik dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{maksimalkan } f(x) &= (-1{,}5519x_1^2 + 0{,}07513x_1 + 1{,}1639) + (-3{,}3005x_2^2 + 4{,}0736x_2 + 2{,}4753) \\ &+ (-1{,}3744x_3^2 + 0{,}3457x_3 + 1{,}0308) + (-3{,}3194x_4^2 + 0{,}0844x_4 + 0{,}2395) \\ &+ (-0{,}8537x_5^2 + 0{,}5319x_5 + 0{,}6402) \end{aligned} \quad (3)$$

Selanjutnya, ditentukan batasan atau kendala sebagai syarat untuk memastikan bahwa solusi yang dihasilkan dari fungsi tujuan tetap berada dalam ruang keputusan yang dapat diterapkan secara realistis. Batasan ini ditentukan dengan mempertimbangkan kapasitas maksimum lahan yang dialokasikan untuk masing-masing komoditas tanaman. Adapun batasan tersebut diformulasikan; $0 < x_1 \leq 73$; $0 < x_2 \leq 119$; $0 < x_3 \leq 18$; $0 < x_4 \leq 41$; $0 < x_5 \leq 58$; dan $x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \leq 1000$. Dengan terbentuknya fungsi tujuan dan batasan, maka model program kuadratik untuk optimasi produksi tanaman pangan telah disusun secara lengkap. Model ini merepresentasikan hubungan matematis antara alokasi lahan dan hasil produksi yang ingin dimaksimalkan dengan mempertimbangkan batasan luas lahan yang berlaku di lapangan. Model yang telah dibangun diselesaikan secara numerik menggunakan metode fungsi penalti eksterior untuk memperoleh solusi optimal.

Model optimasi yang dibangun dalam penelitian ini memiliki fungsi tujuan berbentuk kuadratik yang dilengkapi dengan kendala berupa batasan maksimum alokasi lahan untuk setiap komoditas tanaman. Untuk menyelesaikan masalah ini, digunakan metode fungsi penalti eksterior, sehingga perlu dilakukan transformasi model ke dalam bentuk model optimasi tanpa kendala dengan cara menggabungkan fungsi tujuan dan penalti dari pelanggaran kendala ke dalam fungsi objektif yang baru. Hasil transformasi model dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \min Z = -(&-1{,}5519x_1^2 - 3{,}3005x_2^2 - 1{,}3744x_3^2 - 3{,}3194x_4^2 - 0{,}8537x_5^2 + 0{,}07513x_1 + 4{,}0736x_2 \\ &+ 0{,}3457x_3 + 0{,}0844x_4 + 0{,}5319x_5 + 5{,}5497) \\ &+ \mu_k[[\max(0, x_1 - 73)]^2 + [\max(0, x_2 - 119)]^2 + [\max(0, x_3 - 18)]^2 \\ &+ [\max(0, x_4 - 41)]^2 + [\max(0, x_5 - 58)]^2] \end{aligned} \quad (4)$$

Transformasi model program kuadratik ke dalam bentuk fungsi penalti eksterior telah mengubah masalah optimasi dengan kendala menjadi masalah optimasi tanpa kendala. Dengan pendekatan ini, seluruh kendala yang semula terbentuk secara eksplisit telah direpresentasikan secara implisit dalam bentuk penalti yang dikenakan langsung pada fungsi tujuan. Setelah model optimasi program kuadratik diubah menjadi model optimasi tanpa kendala, langkah selanjutnya adalah menyelesaikan model tersebut secara numerik untuk memperoleh solusi optimal. Untuk menemukan titik optimum dari fungsi Z, langkah yang akan dilakukan adalah menurunkan fungsi tersebut terhadap setiap variabel keputusan x_i. Bentuk turunan fungsi Z terhadap setiap variabel keputusan x_i disajikan sebagai berikut:

$$\frac{dZ}{dx_1} = 3{,}1038x_1 - 0{,}0751 + 2\mu_k[\max(0, x_1 - 73)] = 0 \quad (5a)$$

$$\frac{dZ}{dx_2} = 6{,}6010x_2 - 4{,}0736 + 2\mu_k[\max(0, x_2 - 119)] = 0 \quad (5b)$$

$$\frac{dZ}{dx_3} = 2{,}7488x_3 - 0{,}3457 + 2\mu_k[\max(0, x_3 - 18)] = 0 \quad (5c)$$

$$\frac{dZ}{dx_4} = 6{,}6388x_4 - 0{,}0844 + 2\mu_k[\max(0, x_4 - 41)] = 0 \quad (5d)$$

$$\frac{dZ}{dx_5} = 1{,}7074x_5 - 0{,}5319 + 2\mu_k[\max(0, x_5 - 58)] = 0 \quad (5e)$$

Dalam penerapannya, metode fungsi penalti eksterior mempertimbangkan dua kemungkinan kondisi, yaitu ketika solusi berada pada wilayah memenuhi kendala (*feasible*) dan ketika solusi melanggar kendala (*infeasible*). Dengan demikian, perumusan fungsi minimum dari kedua kondisi tersebut dapat dituliskan kembali sebagai berikut:

$$\min[3{,}1038x_1 - 0{,}0751,\quad 3{,}1038x_1 - 0{,}0751 + 2\mu_k(x_1 - 73)] = 0 \quad (6a)$$

$$\min[6{,}601x_2 - 4{,}0736,\quad 6{,}601x_2 - 4{,}0736 + 2\mu_k(x_2 - 119)] = 0 \quad (6b)$$

$$\min[2{,}7488x_3 - 0{,}3457,\quad 2{,}7488x_3 - 0{,}3457 + 2\mu_k(x_3 - 18)] = 0 \quad (6c)$$

$$\min[6{,}6388x_4 - 0{,}0844,\quad 6{,}6388x_4 - 0{,}0844 + 2\mu_k(x_4 - 41)] = 0 \quad (6d)$$

$$\min[1{,}7074x_5 - 0{,}5319,\quad 1{,}7074x_5 - 0{,}5319 + 2\mu_k(x_5 - 58)] = 0 \quad (6e)$$

Kemudian untuk tahap selanjutnya adalah melakukan inisialisasi parameter awal agar proses optimasi terhadap fungsi objektif dapat dilakukan. Parameter awal dalam penelitian ini ditetapkan masing-masing nilai parameter yaitu $\mu_k = 2$, $\beta = 2$, dan toleransi error $\varepsilon = 0{,}0001$. Pemilihan nilai μk yang relatif kecil bertujuan untuk menghindari dominasi penalti pada tahap awal iterasi, sehingga pencarian solusi tetap diarahkan oleh fungsi tujuan utama.

Tabel 2. Hasil Iterasi Penyelesaian Model Menggunakan Metode Fungsi Penalti Eksterior Terhadap Data Observasi Awal

I	μ_k	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	Z	μ_k·P(x)
1	2	198,8713	198,3599	198,7226	198,0363	199,0911	617486	202518
2	4	197,2471	196,4197	196,7309	195,4654	197,6229	805994	397477,29
3	8	194,6471	193,8885	193,3330	191,69,64	195,0521	1173902	773840,17
4	16	190,1503	190,2163	187,1891	185,6015	190,3339	1869942	148237,51
5	32	182,0626	184,4069	176,8465	175,1150	181,5401	3114956	2746968,71
6	64	167,5375	174,8216	156,1594	156,7858	165,4175	5092745	4757586,79
7	128	142,8160	159,3814	119,6204	126,1038	137,6367	7425395	7143040,80
8	256	106,6270	137,6581	67,2623	81,6936	96,6283	7989903	7786576,09
9	512	71,8621	117,6476	16,6332	39,4811	56,9085	3727411	3611537,81
10	1024	71,6391	116,8751	16,5878	39,2191	56,8118	61485,9407	0,0000

Berdasarkan hasil iterasi yang ditampilkan pada Tabel 2 terlihat bahwa nilai variabel keputusan mengalami perubahan secara bertahap pada setiap langkah perhitungan. Perubahan ini menunjukkan adanya proses penyesuaian nilai variabel terhadap peningkatan parameter μ_k. Seiring bertambahnya nilai μ_k, variabel keputusan bergerak mendekati nilai yang semakin stabil, hingga mencapai titik konvergen. Pola perubahan ini menggambarkan bahwa algoritma yang digunakan bekerja secara konsisten dalam mengarahkan solusi ke arah yang lebih optimal. Kemudian dilakukan pemeriksaan karakteristik solusi optimal terhadap model optimasi dari persamaan (8) berdasarkan matriks *Hessian* sebagai berikut:

$$H = \begin{bmatrix} 3{,}1038 + 2\mu_k & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6{,}6010 + 2\mu_k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2{,}7488 + 2\mu_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6{,}6388 + 2\mu_k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}7074 + 2\mu_k \end{bmatrix}$$

Pemeriksaan syarat cukup keoptimalan dilakukan untuk memastikan bahwa solusi yang diperoleh dengan metode fungsi penalti eksterior merupakan nilai minimum. Karena seluruh elemen diagonal dari matriks Hessian bernilai positif, maka matriks tersebut bersifat definit positif. Hal ini menunjukkan bahwa nilai hasil iterasi merupakan minimum lokal. Dengan demikian, solusi optimal alokasi lahan yang diperoleh berdasarkan hasil simulasi model, yaitu diperoleh 71,6391 hektar untuk kentang, 116,8751 hektar untuk bawang merah, 16,5878 hektar untuk cabai, 39,2191 hektar untuk kubis, dan 56,8118 hektar untuk jagung. Evaluasi terhadap fungsi objektif berdasarkan hasil alokasi lahan optimal diperoleh sebesar 61.485,9407 ton yang merepresentasikan total estimasi hasil produksi dari seluruh komoditas tanaman pangan.

Hasil penyelesaian ini membuktikan bahwa penerapan pendekatan program kuadratik efektif dalam memodelkan hubungan nonlinier antara luas lahan dan hasil produksi dan penerapan metode fungsi penalti eksterior terbukti mampu menyelesaikan masalah optimasi yang melibatkan kendala secara efisien. Transformasi model yang semula memiliki batasan berupa kendala alokasi lahan diubah menjadi model optimasi tanpa kendala melalui penambahan fungsi penalti ke dalam fungsi tujuan. Hal ini dilakukan tanpa mengubah struktur dasar dari model, sehingga proses optimasi tetap dapat dijalankan secara numerik dalam ruang solusi layak dan menghasilkan solusi yang optimal. Dengan demikian, kombinasi antara pendekatan program kuadratik dan metode fungsi penalti eksterior dalam penelitian ini mampu menjawab permasalahan pengalokasian lahan pertanian secara praktis dan sistematis.

Model yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat dijadikan sebagai dasar pertimbangan dalam merancang strategi alokasi lahan tanam yang optimal. Hal ini dapat memungkinkan perencanaan lahan dapat dilakukan secara lebih efisien tanpa memerlukan perluasan area tanam, namun tetap mampu mendorong peningkatan hasil produksi secara signifikan. Selain itu, model ini juga dapat dimanfaatkan sebagai referensi dalam pengambilan keputusan untuk merumuskan kebijakan yang memperkuat sistem pengelolaan kawasan Food Estate agar lebih terukur, sehingga kawasan tersebut dapat berkontribusi nyata dalam mendukung ketahanan pangan nasional di masa mendatang.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa model program kuadratik yang dibangun secara matematis berhasil merepresentasikan hubungan antara alokasi lahan dan hasil produksi dengan sangat realistis. Hal ini dikarenakan model tersebut mempertimbangkan efek nonlinieritas dalam respons produksi terhadap perluasan lahan tanam. Selain itu, penggunaan metode fungsi penalti eksterior terbukti efektif untuk menyelesaikan model optimasi program kuadratik, yang pada gilirannya memungkinkan konversi masalah optimasi dengan kendala menjadi model optimasi tanpa kendala melalui penambahan fungsi penalti.

Solusi optimal yang diperoleh menunjukkan alokasi lahan yang efisien untuk masing-masing komoditas tanaman, dengan rincian alokasi lahan sebesar 71,6391 hektar untuk kentang, 116,8751 hektar untuk bawang merah, 16,5878 hektar untuk cabai, 39,2191 hektar untuk kubis, dan 56,8118 hektar untuk jagung. Dengan alokasi lahan tersebut, total hasil produksi optimal yang dicapai adalah sebesar 61.485,9407 ton. Hal ini menunjukkan bahwa solusi optimum dapat dicapai tanpa perluasan area tanam, yang berarti efisiensi alokasi lahan tetap terjaga sambil menghasilkan produksi optimal. Temuan ini memberikan kontribusi positif terhadap pengelolaan pertanian berkelanjutan di kawasan Food Estate Humbang Hasundutan.

DAFTAR PUSTAKA

Afandi, M. (2024). Kebijakan Pemerintah Indonesia Terhadap Krisis Produk Pangan Global. *Jurnal Ilmu Hukum, Sosial, dan Humaniora, 2(9)*: 311–317.

Fitri, S., & Helma (2023). Optimasi Rata-Rata Produksi Jagung di Kabupaten Lima Puluh Kota Menggunakan Pemrograman Kuadratik Metode Wolfe. *Journal Of Mathematics UNP, 8*(2): 20–30.

Feng, Z., Niu, W. & Cheng, C. (2017). A Quadratic Programming Approach for Fixed Head Hydropower System Operation Optimization Considering Power Shortage Aspect. *Journal of Water Resources Planning and Management, 143*(10).

Hikmah, N., & Ahmad, D. (2022). Optimasi Rata - Rata Produksi Ubi Kayu dan Kedelai di Kabupaten Pasaman Barat Menggunakan Pemrograman Kuadratik Metode Wolfe. *Journal Of Mathematics UNP*, *7*(1): 41–51.

Insani, S., & Sari, E. (2017). Optimasi Tanaman Pangan di Kota Magelang Dengan Pemrograman Kuadratik dan Metode Fungsi Penalti Eksterior. *Jurnal Matematika, 6*(2): 40-51.

Rao, S. S. (2020). *Engineering Optimization Theory and Practice* (5th ed). Hoboken: John Wiley & Sons.

Safani, E., & Sari, D. P. (2020). Optimasi Produksi Tanaman Padi dan Jagung di Kabupaten Pesisir Selatan Menggunakan Metode Fungsi Penalti Eksterior. *UNPjoMath*, *3*(3): 44–49.

Safitri, E., dkk. (2023). Optimasi Biaya Pemupukan Tanaman Padi pada Kelompok Tani Rambahan Sakato, Desa Nyiur Melambai Pelangai menggunakan Metode *Kuhn Tucker*. *Jurnal Publikasi Ilmiah Matematika. 8*(1): 1-11.

Satria, Y., Helmi., & Kiftiah, M. (2024). Penentuan Produktivitas Padi di Kalimantan Barat Menggunakan Metode Fungsi Penalti Eksterior. *Buletin Ilmiah Math. Stat. Dan Terapan (Bimaster), 5*(13): 669-678.

Sinaga, A. P., & Sinaga, L. P. (2023). Rekonstruksi Model Program Nonlinear dengan Fungsi Polinomial Menjadi Bentuk Program Kuadrat. *Jurnal Riset Rumpunan Ilmu Pendidikan (JURRIPEN), 2*(1): 58-69.

Sitanggang, R. P., & Sinaga, L. P. (2023). Analisis Optimasi Program Kuadratik dengan Fungsi Penalty. *Jurnal Riset Rumpun Ilmu Pendidikan (JURRIPEN). 2*(1): 32-42.

Wulandari., & Lubis, R. S. (2024). Optimization of Rice (Oryza Sativa) Crop in Simalungun District using Quadratic Programming Wolfe Model and Exterior Penalty Function Method. *Jurnal Pengkajian Ilmu dan Pembelajaran Matematika dan IPA IKIP Mataram, 12*(1): 232-249.