

Determinasi Faktor Kunci yang Memengaruhi Keberlanjutan Pertanian Kentang Sebagai Dasar Pengembangan Teknologi Smart Farming Berbasis *Internet of Things* (IoT)

Determination of Key Factors Affecting the Sustainability of Potato Farming as a Basis for Developing Internet of Things (IoT)-Based Smart Farming Technology

**Mai Fernando Nainggolan^{*1}, Maryanti Sitohang¹, Perdi Setiawan², Dedi Djuliansah²,
Tennisya Febriyanti Suardi³**

¹Program Studi Agribisnis, Fakultas Pertanian, Universitas Santo Thomas

²Program Studi Agribisnis, Fakultas Pertanian, Universitas Siliwangi

³Program Studi Agribisnis, Fakultas Pertanian, Universitas Medan Area

*Email: mai_fernando@ust.ac.id

(Diterima 08-12-2025; Disetujui 21-01-2026)

ABSTRAK

Pertanian kentang merupakan komoditas hortikultura strategis yang berperan penting dalam perekonomian lokal dan ketahanan pangan. Namun, keberlanjutan sistem produksi kentang menghadapi berbagai tantangan, termasuk variabilitas iklim, inefisiensi input, dan rendahnya adopsi teknologi budidaya. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi faktor-faktor kunci yang memengaruhi keberlanjutan pertanian kentang sebagai dasar perancangan teknologi *Smart Farming* berbasis Internet of Things (IoT). Analisis dilakukan menggunakan metode *Matrice d'Impacts Croisés-Multiplication Appliquée à un Classement* (MICMAC) terhadap 15 variabel yang mewakili dimensi penguatan, sumber daya manusia, pasar, dan lingkungan. Data dikumpulkan melalui survei, wawancara mendalam, dan *Focus Group Discussion* (FGD) pada petani kentang di Kabupaten Simalungun. Hasil analisis *Matrix of Direct Influence* (MDI) menunjukkan bahwa Perluasan Pasar, Tingkat Pendidikan, dan Harga merupakan variabel determinan yang memiliki pengaruh tinggi dan ketergantungan rendah. Sementara itu, Teknologi, Pengalaman atau sertifikasi pelatihan, dan Pembinaan petani termasuk kategori key variables yang memiliki pengaruh dan ketergantungan tinggi, sehingga menjadi faktor strategis dalam pengembangan *Smart Farming*. Berdasarkan *Matrix of Indirect Influence* (MII), variabel Teknologi, Pendidikan Petani, Harga, Pengalaman, dan Perluasan Pasar memiliki pengaruh tidak langsung yang kuat terhadap sistem. Temuan ini menegaskan bahwa desain teknologi IoT yang efektif harus mempertimbangkan faktor teknis dan sosial-ekonomi yang saling berinteraksi dalam sistem pertanian kentang. Penelitian ini memberikan dasar ilmiah bagi penguatan transformasi digital pertanian serta perumusan kebijakan inovasi yang lebih adaptif dan berkelanjutan.

Kata kunci: MICMAC, *smart farming*, IoT, keberlanjutan pertanian, kentang

ABSTRACT

Potato farming is a strategic horticultural commodity that plays a vital role in the local economy and food security. However, the sustainability of potato production systems faces various challenges, including climate variability, input inefficiency, and low adoption of cultivation technologies. This study aims to identify key factors influencing the sustainability of potato farming as a basis for designing Internet of Things (IoT)-based Smart Farming technology. The analysis was conducted using the Matrix of Impacts Croisés-Multiplication Appliquée à un Classement (MICMAC) method on 15 variables representing the reinforcing dimensions, human resources, markets, and the environment. Data were collected through surveys, in-depth interviews, and Focus Group Discussions (FGDs) with potato farmers in Simalungun Regency. The results of the Matrix of Direct Influence (MDI) analysis indicate that Market Expansion, Education Level, and Price are determinant variables with high influence and low dependency. Meanwhile, Technology, Experience or training certification, and Farmer Development are included in the category of key variables with high influence and dependency, thus becoming strategic factors in the development of Smart Farming. Based on the Matrix of Indirect Influence (MII), the variables Technology, Farmer Education, Price, Experience, and Market Expansion have a strong indirect influence on the system. This finding confirms that effective IoT technology design must consider the interacting technical and socio-economic factors in potato farming systems. This research provides a scientific basis for strengthening the digital transformation of agriculture and formulating more adaptive and sustainable innovation policies.

Keywords: MICMAC, *smart farming*, IoT, agricultural sustainability, potatoes

PENDAHULUAN

Pertanian merupakan sektor strategis dalam perekonomian Indonesia karena berkontribusi besar terhadap penyediaan pangan, penciptaan lapangan kerja, dan peningkatan kesejahteraan masyarakat pedesaan (Quirinno, 2024). Salah satu komoditas hortikultura unggulan dengan nilai ekonomi tinggi adalah kentang (*Solanum tuberosum L.*) (Alin, 2022). Kabupaten Simalungun di Provinsi Sumatera Utara menjadi salah satu sentra produksi kentang nasional yang didukung oleh kondisi agroklimat yang sesuai untuk budidaya, ketersediaan tenaga kerja, dan lahan pertanian yang relatif luas (Napitupulu, 2024). Keunggulan ini menjadikan komoditas kentang sebagai salah satu penggerak ekonomi lokal yang potensial untuk terus dikembangkan.

Meskipun demikian, produktivitas kentang di Kabupaten Simalungun masih menghadapi berbagai tantangan yang menghambat optimalisasi hasil. Ketidakstabilan iklim, meningkatnya serangan organisme pengganggu tanaman (OPT), penggunaan input produksi yang tidak efisien, serta terbatasnya teknologi budidaya yang diterapkan petani menjadi faktor utama penyebab rendahnya produktivitas (Tadele, 2017). Kondisi ini menegaskan perlunya pendekatan inovatif dalam manajemen budidaya kentang agar produksi dapat lebih adaptif, efisien, dan berkelanjutan.

Dalam menghadapi tantangan globalisasi, perubahan iklim, dan tuntutan pasar yang semakin kompetitif, penerapan teknologi Smart Farming berbasis Internet of Things (IoT) menjadi solusi potensial. IoT memungkinkan integrasi sensor, aktuator, serta sistem pengendali berbasis data real-time yang dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air, pupuk, pestisida, hingga energi dalam budidaya kentang (Saiz, 2020). Melalui pemanfaatan teknologi ini, petani dapat mengoptimalkan proses produksi, menekan biaya operasional, serta meningkatkan kualitas dan kuantitas hasil panen. Pengembangan Smart Farming tidak lepas dari berbagai faktor yang saling memengaruhi, baik aspek teknis, sosial, ekonomi, maupun kelembagaan (Carlo, 2022).

Upaya meningkatkan keberlanjutan sistem pertanian kentang sering kali terkendala oleh belum teridentifikasinya faktor-faktor kunci yang memiliki pengaruh dominan terhadap dinamika sistem (Gao, 2025). Penelitian konvensional umumnya berfokus pada aspek teknis budidaya, seperti pemupukan, pengendalian hama, dan manajemen lahan, sehingga hubungan antarfaktor dalam sistem pertanian yang bersifat saling memengaruhi dan saling bergantung kerap terabaikan. Ketidaktelitian dalam memahami kompleksitas ini dapat menyebabkan kebijakan atau intervensi teknologi yang kurang efektif dalam mendukung keberlanjutan pertanian kentang.

Dalam konteks tersebut, diperlukan suatu pendekatan analitis yang mampu mengungkap struktur pengaruh dan ketergantungan antarvariabel secara komprehensif. Pendekatan ini harus mampu memetakan interaksi sistemik antara aspek ekologis, sosial, ekonomi, dan teknis guna menghasilkan dasar kebijakan yang lebih akurat dan mendukung inovasi teknologi yang tepat sasaran. Dengan analisis yang lebih holistik, pengembangan strategi smart farming berbasis IoT atau intervensi lainnya dapat dirancang secara lebih efektif untuk meningkatkan ketahanan dan keberlanjutan sistem pertanian kentang.

Metode Matrice d'Impacts Croisés-Multiplication Appliquée à un Classement (MICMAC) menjadi salah satu pendekatan yang relevan untuk menganalisis sistem pertanian yang kompleks (Duperin dan Godet, 1973). Melalui pemetaan tingkat pengaruh dan ketergantungan antarvariabel, analisis MICMAC memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi determinan kunci (key factors) yang paling menentukan keberlanjutan pertanian kentang. Faktor-faktor tersebut dapat meliputi kondisi agroekologi, efisiensi input hara, ketersediaan sarana produksi, akses pengetahuan dan pelatihan, dinamika pasar, serta tingkat adopsi teknologi. Penentuan faktor-faktor strategis ini penting sebagai dasar perancangan intervensi berbasis teknologi yang efektif.

Perkembangan smart farming berbasis Internet of Things (IoT) menawarkan peluang besar untuk meningkatkan efisiensi, akurasi, dan keberlanjutan produksi kentang (Dhanaraju, 2022). Teknologi IoT memungkinkan pemantauan kondisi tanah, cuaca, hara, dan kesehatan tanaman secara real-time melalui sensor yang terhubung dengan sistem pengendalian dan analitik data (Senapaty, 2023). Namun, keberhasilan implementasi smart farming tidak hanya bergantung pada kecanggihan teknologi, tetapi juga pada kesesuaian teknologi tersebut dengan faktor-faktor kunci yang memengaruhi keberlanjutan usahatani. Oleh karena itu, pemahaman mengenai determinan sistem pertanian kentang melalui analisis MICMAC menjadi fondasi penting dalam merancang teknologi IoT yang adaptif, relevan, dan berkelanjutan.

Keberhasilan implementasi smart farming dalam sistem budidaya kentang tidak semata-mata ditentukan oleh tingkat kecanggihan teknologi yang digunakan. Teknologi modern seperti sensor IoT, sistem monitoring berbasis jaringan, dan perangkat otomasi memang mampu meningkatkan efisiensi pengelolaan lahan. Namun, teknologi tersebut hanya akan memberikan dampak optimal apabila benar-benar sesuai dengan kondisi ekologis, sosial, dan teknis yang dihadapi oleh petani di lapangan.

Dalam konteks keberlanjutan usahatani, kesesuaian teknologi dengan faktor-faktor kunci menjadi aspek fundamental yang tidak dapat diabaikan (Qaim, 2020). Faktor-faktor ini mencakup variabel biofisik, manajerial, ekonomi, serta sosial yang secara langsung maupun tidak langsung memengaruhi dinamika produksi kentang (Divya, 2021). Tanpa pemahaman yang mendalam mengenai bagaimana faktor-faktor tersebut saling berinteraksi, pengembangan teknologi smart farming berisiko tidak adaptif dan sulit diimplementasikan secara berkelanjutan.

Oleh karena itu, analisis MICMAC berperan strategis dalam mengidentifikasi determinan utama sistem pertanian kentang. Hasil analisis ini dapat digunakan sebagai dasar untuk merancang teknologi IoT yang tidak hanya relevan, tetapi juga mampu menyesuaikan diri dengan kompleksitas sistem yang ada. Dengan pendekatan ini, pengembangan smart farming menjadi lebih terarah, berkelanjutan, serta mampu memberikan manfaat jangka panjang bagi peningkatan produktivitas dan ketahanan sistem pertanian kentang.

Dengan demikian, penelitian ini menjadi penting untuk dilakukan karena mampu memberikan gambaran holistik mengenai faktor-faktor kunci keberlanjutan pertanian kentang, sekaligus menyediakan dasar ilmiah bagi pengembangan model smart farming berbasis IoT yang lebih responsif terhadap kondisi lapangan. Hasil penelitian diharapkan dapat mendukung transformasi digital sektor hortikultura, memperkuat ketahanan pangan, serta mendorong keberlanjutan sistem pertanian di kawasan dataran tinggi.

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Penentuan Sampel Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode studi kasus (case study) yaitu penelitian yang dilihat langsung kelapangan, dengan petani sebagai unit analisisnya. Pemilihan lokasi penelitian ditentukan secara purposive atau sengaja di sentra sentra pertanian kentang di kabupaten Simalungun. Lokasi penelitian ini dipilih sebagai lokasi penelitian berdasarkan pertimbangan yang telah sesuai dengan tujuan dalam penelitian ini.

Sampel dalam penelitian ini adalah Petani Kentang yang berada di sekitar Kabupaten Simalungun. Jumlah populasi adalah sebanyak 100 orang yang berasal dari 5 Kecamatan. Dalam penelitian ini sampel yang diteliti sebanyak 20 orang yang dianggap mewakili populasi. Dimana cara penarikan sampel dilakukan dengan menggunakan teknik Proportionate Stratified Random Sampling, yaitu cara pengambilan sampel dari anggota populasi secara acak dan berstrata secara proporsional yang dikhususkan pada bagian masyarakat sekitar. Metode pengumpulan data dengan wawancara dengan Petani Kentang menggunakan kuesioner terstruktur. Data yang dikumpulkan pada penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder sesuai dengan kebutuhan penelitian. Untuk menganalisis besarnya kontribusi terhadap dan persepsi petani.

Jenis dan Sumber Data

Kategori data yang dikumpulkan adalah data primer dan sekunder. Terdapat empat dimensi yang menjadi acuan dalam membangun atribut atau variabel yaitu: Faktor penguat, Sumber daya manusia (SDM), Pasar dan Lingkungan, seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Sedangkan atribut atau variabel yang digunakan atau dibangun sebagai kuesioner berdasarkan hasil yang diperoleh secara langsung dari wawancara secara mendalam, Focus Group Discussion (FGD), dan observasi langsung. Penggalian informasi melalui kuesioner dilakukan pada stakeholder seperti: pengambil kebijakan sebuah sistem di bidang pertanian Kentang di kabupaten Simalungun, instansi terkait (pemerintah), industri, petani kentang dan responden ahli. Implementasi dalam pengisian kuisioner yang menggambarkan hubungan langsung antar variabel dilakukan dengan mengkuantifikasi penggunaan skala 0 sampai 3 dan P seperti dilustrasikan oleh Godet (1989):

0 = tidak ada hubungan (*non-existent*)

1 = hubungan lemah (*low direct influence*)

2 = hubungan sama rata (*medium direct influence*)

3 = hubungan kuat (*high direct influence*)

P = berpotensial (*potential influence*)

Tabel 1. Identifikasi Dimensi dan Variabel

Dimensi	Variabel/atribut	
	Long Label	Short Label
Faktor penguat	Kelembagaan (<i>Institution</i>)	Klbg(Inst)
	Infrastruktur (<i>Infrastructure</i>)	Ifst(Infra)
	Perekonomian Daerah (<i>Regional Economy</i>)	PeDa(Econ)
	Modal (<i>Capital</i>)	Mdl(Cap)
	Teknologi (<i>Technology</i>)	Tek(Tech)
Sumber Daya Manusia (SDM)	Tingkat pendidikan (<i>Level of Education</i>)	TiPe(Educ)
	Pengalaman/sertifikasi pelatihan pertanian (<i>Farmer Experience</i>)	Pglm(Expe)
	Pembinaan terhadap petani (<i>Construction of Farmer</i>)	Pmbn(Cont)
Pasar	Harga (<i>Price</i>)	Hrg(Pric)
	Perluasan Pasar (<i>Market Expansion</i>)	PePa(Mrkt)
	Distribusi (<i>Distribution</i>)	Dist(Dist)
	Kualitas (<i>Quality</i>)	Klts(Qual)
Lingkungan	Iklim/cuaca (<i>Climate or Weather</i>)	Iklm(Clim)
	Luas lahan pertanian (<i>Farmer Area</i>)	LLhn(Area)
	Kualitas lingkungan (<i>Environmental Quality</i>)	(SWQ)

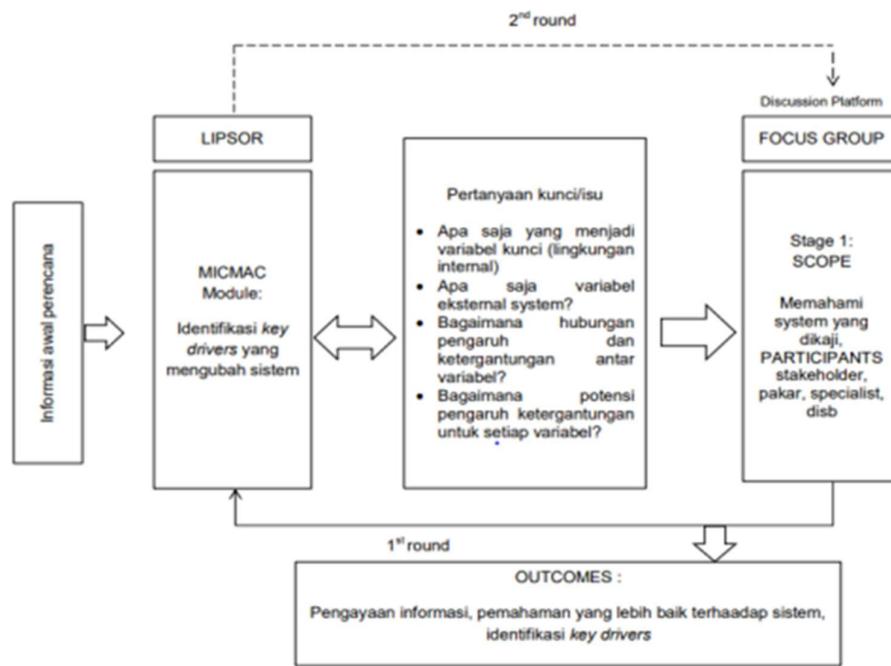
Metode Analisis

Proses analisis data hasil pengisian kuisioner yang dilakukan menggunakan MICMAC adalah dengan mengkonversikan bobot tiap variabel ke dalam matriks pengaruh langsung (Matrix of Direct Influence/MDI) sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Tabulasi Keterkaitan Hubungan Antara Influence dan Dependence

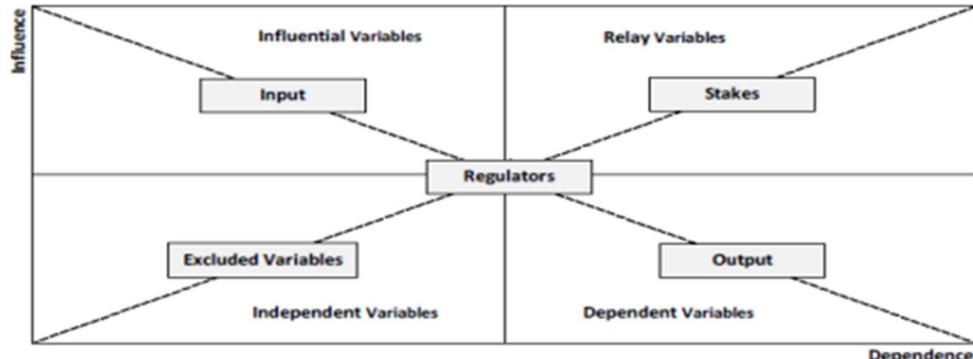
	V1	V2	V3...	Vn	Influence (Y-Axis)
V1	0	(V1, V2)	(V1, V3) ...	(V1, Vn)	\sum (Var1-j)
V2	(V2, V1)	0	(V2, V3)	(V2, Vn)	
V3	(V3, V1)	(V3, V2)	0	(V3, Vn)	
...					
Vn	(Vn, V1)	(Vn, V2)	(Vn, V3)	0	
Dependence (X-Axis)	\sum (Varj-1)				

Menurut Fauzi, (2019) tahapan analisis MICMAC didasarkan dua tahapan utama. Tahapan pertama adalah pemahaman terhadap lingkup masalah dan sistem yang akan dikaji. Alur analisis menggunakan MICMAC dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka Kerja MICMAC (Framework of MICMAC) (Fauzi, 2019)

Tahap selanjutnya adalah menganalisis intensitas pengaruh dan ketergantungan antar variabel yang ditentukan oleh letak variabel pada peta kuadran seperti yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Ilustrasi Hasil Analisis MICMAC (Illustration of MICMAC Analysis Results) (Godet, 1989)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Matriks Pengaruh Langsung (*Matrix of Direct Influence*)

Berdasarkan hasil penyebaran kuisioner dan FGD, terdapat variabel-variabel yang telah ditetapkan dan dikuantifikasi hubungannya diantara variabel yang telah dibangun sehingga diperoleh matrik pengaruh langsung seperti ditunjukkan oleh Tabel 1. Melalui aplikasi MICMAC maka Gambar 3 berupa Matrix of Data Influence (MDI) dirubah kedudukannya menjadi peta variabel, yang mencerminkan atau menggambarkan kedudukan grafik hubungan antara pengaruh - ketergantungan (influencedependence chart) kedalam empat sektor (kuadrant)(Gambar 4).

	15 : KulAL	14 : Lhn	13 : Iklm	12 : Kual	11 : Dist	10 : PePa	9 : Hrg	8 : Pmbn	7 : PgIm	6 : TrPe	5 : Tek	4 : Mdl	3 : PeDa	2 : Ifst	1 : Kibg
1 : Kibg	0	2	2	1	3	1	2	2	2	2	1	2	1	1	1
2 : Ifst	2	0	2	2	3	1	2	2	2	1	1	2	1	1	1
3 : PeDa	1	1	0	3	3	1	1	2	0	1	1	2	1	1	1
4 : Mdl	2	2	2	0	3	1	2	1	1	1	1	2	2	1	2
5 : Tek	2	3	2	3	0	3	2	2	2	2	2	3	2	2	1
6 : TrPe	1	2	2	2	1	0	2	3	2	1	2	1	2	2	1
7 : PgIm	2	1	1	3	3	3	0	2	2	1	2	2	1	1	1
8 : Pmbn	2	3	2	1	2	2	2	0	1	2	1	1	2	1	2
9 : Hrg	2	2	2	2	2	2	2	2	0	2	2	2	1	1	1
10 : PePa	3	3	3	3	3	1	2	3	2	0	3	3	1	1	0
11 : Dist	2	3	2	1	3	1	2	2	2	1	0	1	1	0	0
12 : Kual	1	1	2	2	2	2	2	1	3	1	1	0	1	2	1
13 : Iklm	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
14 : Lhn	1	1	1	1	3	1	2	1	2	1	1	1	1	0	1
15 : KulAL	0	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1	1	0

© LIPSOR-EPITA-MICMAC

Influences range from 0 to 3, with the possibility to identify potential influences:

0: No influence

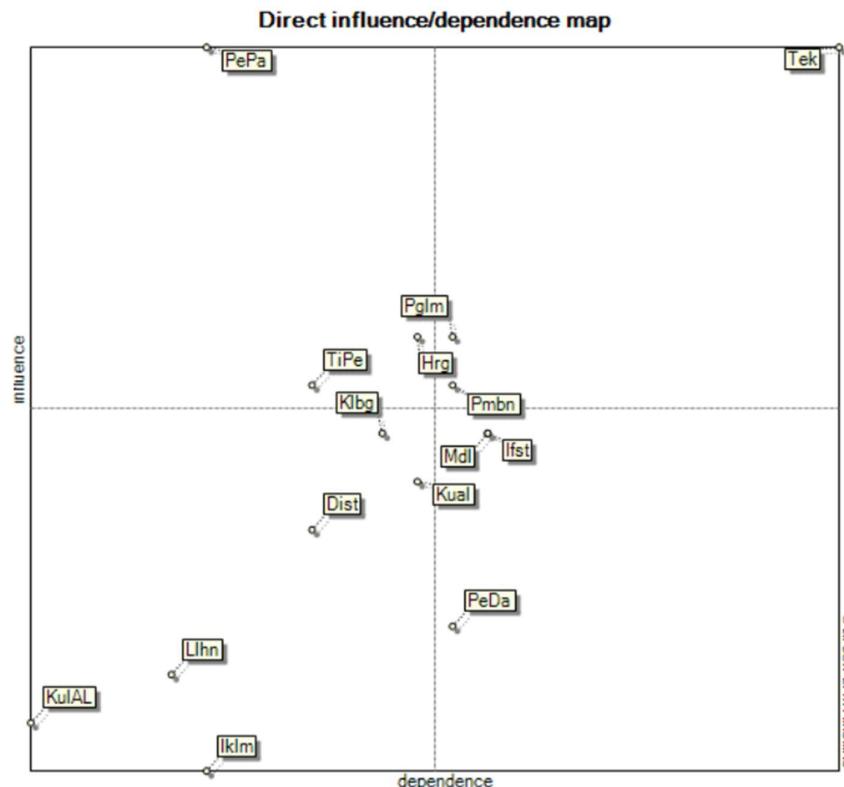
1: Weak

2: Moderate influence

3: Strong influence

P: Potential influences

Gambar 3 Matrik Pengaruh Langsung (*Matrix of Direct Influence*)



Gambar 4 Posisi variabel sistem dalam peta ketergantungan pengaruh langsung (*Position of a system variable in the direct influence-dependence map*)

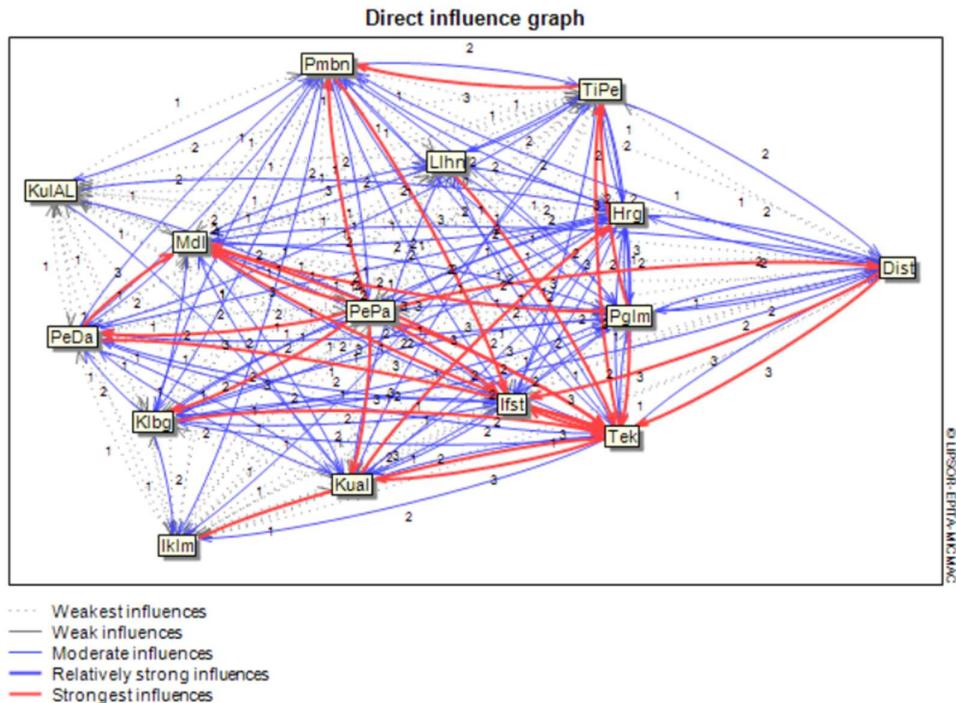
Berdasarkan hasil analisis MICMAC diperoleh bahwa variabel yang berada di kuadran pertama (determinant variables) adalah Perluasan Pasar (PePa), Tingkat Pendidikan (TiPe), dan Harga (Hrg). Karakteristik dari kuadran pertama adalah variabel yang memiliki tingkat pengaruh tinggi dan ketergantungannya yang rendah. Kemudian variabel dengan pengaruh tinggi dengan ketergantungan tinggi, namun hubungan antar variabel tidak stabil berada pada kuadran kedua (key variables) adalah Teknologi (Tek), Pengalaman/sertifikasi pelatihan pertanian (Pglm), dan Pembinaan terhadap petani (Pmbn). Selanjutnya variabel yang ada pada kuadran tiga (result variables) yaitu variabel yang memiliki pengaruh yang rendah dan ketergantungan yang tinggi adalah Kelembagaan (Klbg), Distribuso (Dist), Luas Lahan (Llhn), Kualitas Lingkungan (KulAL), Iklim (Iklm), dan Kualitas (Kual). Kuadran empat (Autonomous variables) adalah variabel, Modal (Mdl), Infrastruktur (Ifst), dan Pendapatan Daerah (PeDa). Variabel pada kuadran empat memiliki pengaruh dan ketergantungan rendah.

Berdasarkan peta pengaruh langsung yang dihasil dari analisis MicMac dapat disimpulkan bahwa terdapat beberapa variabel yang menjadi faktor yang memengaruhi dalam Keberlanjutan Pertanian Kentang Sebagai Dasar Pengembangan Teknologi Smart Farming Berbasis Internet of Things (IoT) seperti Perluasan Pasar (PePa), Tingkat Pendidikan (TiPe), dan Harga (Hrg). Sedangkan yang menjadi faktor kunci yang memengaruhi dalam Keberlanjutan Pertanian Kentang Sebagai Dasar Pengembangan Teknologi Smart Farming Berbasis Internet of Things (IoT) adalah Teknologi (Tek), Pengalaman/sertifikasi pelatihan pertanian (Pglm), dan Pembinaan terhadap petani (Pmbn).

Penelitian terdahulu secara konsisten menekankan bahwa akses pasar yang lebih luas mendorong keberlanjutan usahatani karena meningkatkan stabilitas pendapatan petani. Studi-studi agribisnis menunjukkan bahwa teknologi baru seperti IoT lebih cepat diterima ketika ada jaminan pasar dan nilai ekonomi hasil panen meningkat (Wanglin, 2024). Pendidikan merupakan faktor penting dalam kapasitas petani untuk memahami dan mengoperasikan teknologi baru. Penelitian terkait adopsi teknologi pertanian menyimpulkan bahwa semakin tinggi pendidikan petani, semakin besar peluang mereka menerapkan teknologi digital berbasis IoT (Anwarudin, 2019). Faktor harga atau fluktuasi harga juga terkonfirmasi sebagai pendorong utama keputusan investasi teknologi. Penelitian mengenai perilaku adopsi teknologi menunjukkan bahwa petani cenderung menerapkan inovasi

ketika harga hasil panen relatif stabil dan menguntungkan, sehingga risiko investasi menurun (Abdeljawad, 2024).

Selanjutnya untuk menggambarkan bentuk hubungan antar variabel dinyatakan dalam grafik yang ditunjukkan pada Gambar 5. Berdasarkan gambar tersebut bahwa hubungan yang dinyatakan dengan garis putu-putus abu-abu berarti Weak influences (pengaruh lemah), garis berwarna biru berarti Moderate influences (pengaruh sedang), garis warna biru tua berarti Relatively strong influences (pengaruh relatif kuat) dan garis berwarna merah berarti Strongest influences (pengaruh paling kuat).

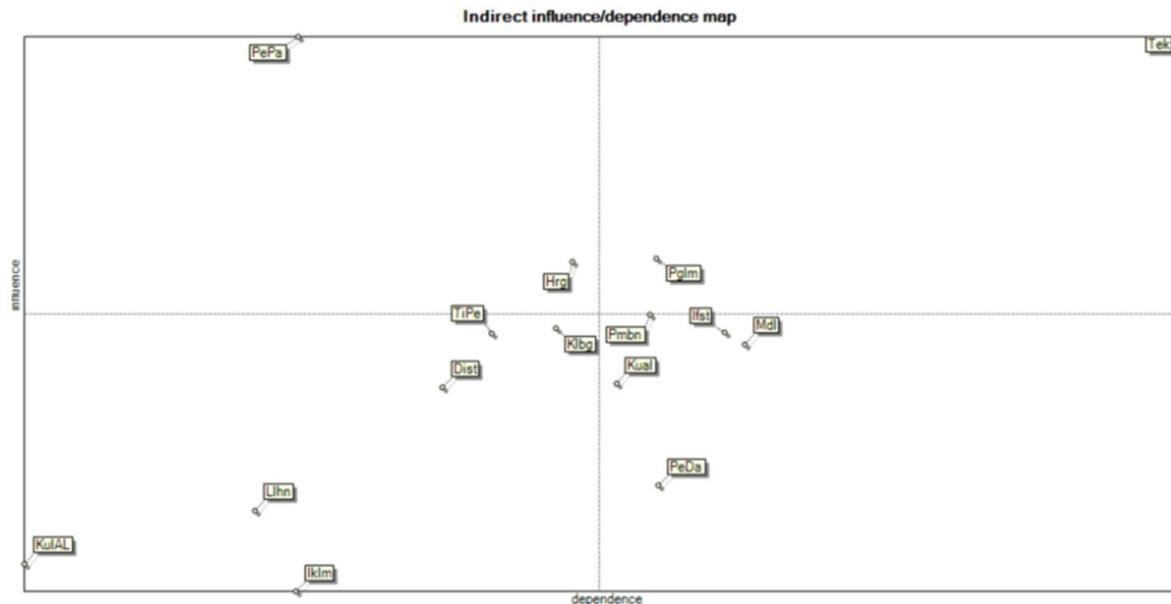


Gambar 5 Ilustrasi grafis variabel pengaruh-dependensi (*Graphic illustration of influence- dependence variables*)

Ilustrasi grafik MICMAC terhadap 15 variabel yang ditandai dengan arah panah menunjukkan pengaruh ketergantungan. Arah panah dari suatu variabel menunjukkan pengaruh variabel tersebut terhadap variabel lainnya. Sebaliknya, arah panah ke suatu variabel menunjukkan bahwa variabel tersebut dipengaruhi oleh (tergantung pada) variabel lainnya. Semakin banyak arah panah dan garis merah tebal dari suatu variabel berarti variabel tersebut memiliki pengaruh besar terhadap banyak variabel lainnya. Demikian juga, semakin banyak arah panah dan garis merah tebal ke suatu variabel berarti variabel tersebut memiliki tingkat ketergantungan yang tinggi dari banyak variabel lainnya. Berdasarkan Gambar 5. beberapa variabel seperti modal, distribusi, teknologi, kualitas dan perluasan pasar mempunyai pengaruh yang kuat terhadap variabel lain ditandai dengan garis merah tebal dan arah panah keluar. Sebaliknya, beberapa variabel yang sama seperti harga, modal, perluasan pasar, kualitas dan pengalaman atau sertifikasi petani sangat dipengaruhi oleh variabel lain yang ditandai dengan arah panah menuju variabel tersebut.

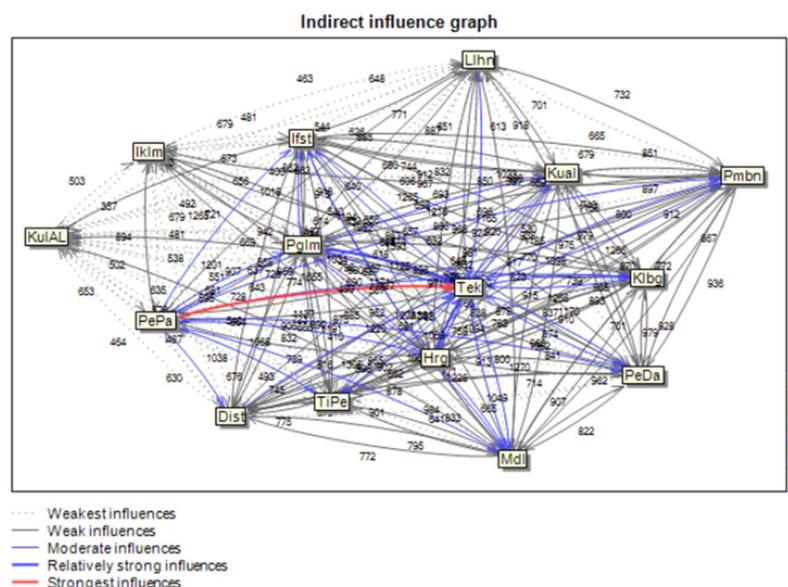
Matriks Pengaruh Tidak Langsung (*Matrix of Indirect Influence*)

Selain berdasarkan MDI, posisi variabel pada kuadran influence-dependence chart juga berdasarkan MII (*Matrix of indirect Influence*) sehingga dapat diketahui perubahan posisinya melalui displacement map. Berdasarkan MII setiap variabel sistem diklasifikasikan kembali ke dalam empat sektor (kuadran) berdasarkan posisinya pada diagram pengaruh ketergantungan (influence-dependence chart), seperti disajikan pada Gambar 6. Akan tetapi pada beberapa variabel tidak terjadi perubahan posisi hanya saja pada variabel modal, pengalaman dan pembinaan mengalami sedikit perpindahan posisi. Hal ini menunjukkan bahwa variabel tidak dipengaruhi oleh adanya pengaruh tidak langsung.



Gambar 6 Posisi variabel sistem dalam pengaruh tidak langsung (Position of a system variable indirect influence)

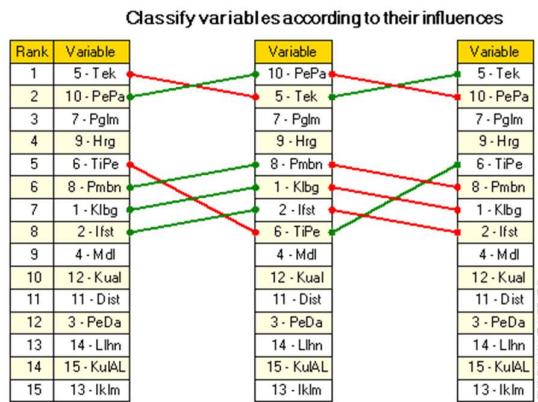
Secara visual reperesentasi kompleksitas interaksi antar variabel sistem yang terkait dengan tingkat pengaruh dan ketergantungannya secara tidak langsung (indirect influence) terhadap variabel lainnya ditunjukkan oleh Gambar 7. Terlihat bahwa secara langsung antara variabel Pendidikan Petani menunjukkan pengaruh dan ketergantungan terhadap variabel teknologi. Dengan katalain jika dalam aktualisasi pengembangan teknologi dalam pertanian kentang perlu meningkatkan pendidikan di tengah petani kentang itu sendiri. Angka pada setiap panah menunjukkan besaran derajat atau rating pengaruh yang diperoleh melalui iterasi matriks Boolean. Berbeda dengan direct influence yang sebagian besar variabel memiliki pengaruh ketergantungan sangat kuat terhadap variabel lainnya (ditandai dengan banyaknya garis merah). Dari gambar 7 dibawah ini yang menjadi perhatian petani di daerah penelitian yaitu variabel Perluasan Pasar (PePa) dan pengaruhnya terhadap pengembangan teknologi. Variabel ini memiliki garis pengaruh langsung yang menunjukkan warna merah sehingga 2 variabel ini sangat berpengaruh dalam Keberlanjutan Pertanian Kentang Sebagai Dasar Pengembangan Teknologi Smart Farming Berbasis *Internet of Things* (IoT)



Gambar 7. Interaksi pengaruh tidak langsung antara variabel (Interaction of indirect influence between variables)

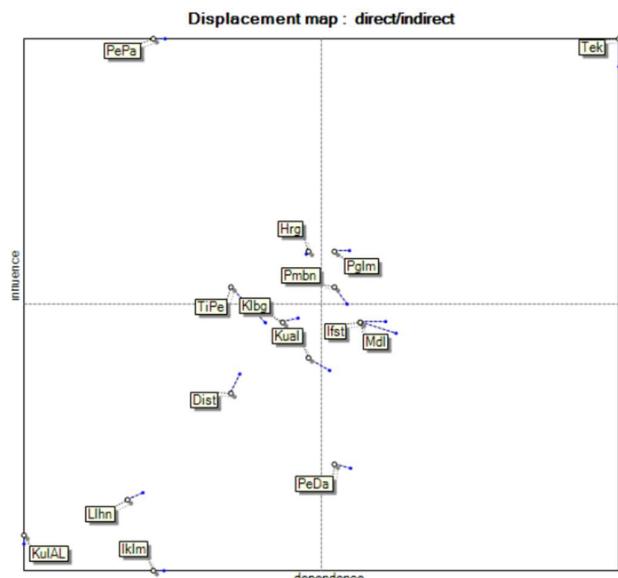
Selanjutnya melalui perubahan dari MDI ke MII diperoleh keterkaitan hubungan seperti ditunjukkan oleh Gambar 8. variabel diurutkan kembali (re-ranking) berdasarkan pengaruhnya terhadap variabel lainnya, sehingga dapat diketahui perubahan urutan suatu variabel dari MDI ke MII. Beberapa variabel sistem mengalami perubahan urutan dari MDI ke MII setelah dilakukan iterasi Boolean, baik yang mengalami kenaikan maupun penurunan urutan.

Berdasarkan tingkat pengaruh dan ketergantungannya variabel diurutkan kembali seperti disajikan pada Gambar 8. Garis merah menunjukkan terjadinya penurunan rangking variabel dan garis hijau menunjukkan kenaikan rangking variabel. Kenaikan atau penurunan rangking terjadi ketika terdapat pengaruh tidak langsung antar variabel. Lima variabel dengan urutan tertinggi berdasarkan influence (pengaruh) adalah Teknologi, Pendidikan Petani, Harga, Pengalaman dan perluasan pasar. Sedangkan lima variabel untuk urutan tertinggi berdasarkan dependent (ketergantungan) adalah harga, modal, perluasan pasar, kualitas dan pengalaman atau sertifikasi petani.



Gambar 8. Perubahan peringkat variabel dari MDI ke MII berdasarkan tingkat pengaruh (*Changes in the ranking of variables from MDI to MII based on the level of influence*)

Perubahan posisi setiap variabel pada peta pengaruh-ketergantungan (influence/ dependence map) dari MDI ke MII juga dapat diketahui melalui peta perubahan variabel (displacement map) yang ditunjukkan oleh Gambar 9. Peta ini menunjukkan variabel mana saja yang mengalami kenaikan, penurunan, atau tetap dalam jangka panjang. Perubahan posisi setiap variabel pada displacement map dari MDI ke MII dimana sebagian besar perpindahan hanya terjadi di dalam kuadran.



Gambar 9. Posisi variabel sistem dalam peta pengaruh / ketergantungan langsung (*Position of a system variable in the direct influence/ dependence map*)

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis MICMAC yang telah dilakukan untuk mengetahui faktor kunci Keberlanjutan Pertanian Kentang Sebagai Dasar Pengembangan Teknologi Smart Farming Berbasis Internet of Things (IoT) diperoleh hasil bahwa variabel kunci yang menjadi pengaruh besar (influence) atau variabel yang sangat memengaruhi variabel lainnya berbasis pada Matrix of Direct Influences (MDI) dan Matrix of Indirect Influences (MII) adalah variabel modal, distribusi dan teknologi. Sedangkan variabel yang memiliki tingkat ketergantungan (dependence) tinggi berbasis pada MDI dan MII adalah variabel harga, modal dan perluasan pasar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada KEMENSAINTEK DIKTI untuk pendanaan dalam pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga mengucap terima kasih untuk dukungan Lembaga Universitas Santo Thomas Medan yang mendukung terlaksananya penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdeljawad I, Abu Alia M, Demaidi M (2024), "Financing constraints and corporate investment decision: evidence from an emerging economy". *Competitiveness Review*, Vol. 34 No. 1 pp. 208–228, doi: <https://doi.org/10.1108/CR-02-2023-0033>
- Alin Deri Utama, Amnilis, & Agung Satriadi. (2022). ANALISIS KELAYAKAN USAHATANI KENTANG (*Solanum Tuberosum L*) GRANOLA L DI KECAMATAN KAYU ARO KABUPATEN KERINCI. *Journal of Scientech Research and Development*, 4(2), 532-542. <https://doi.org/10.56670/jsrd.v4i2.137>
- Anwarudin, O., Sumardjo, S., Satria, A., & Fatchiya, A. (2019). Factors influencing the entrepreneurial capacity of young farmers for farmer succession. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(1), 1008-1014.
- Carlo Giua, Valentina Cristiana Materia, Luca Camanzi,. 2022. Smart farming technologies adoption: Which factors play a role in the digital transition?,*Technology in Society*, 68, 101869, <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.101869>
- Dhanaraju, M., Chenniappan, P., Ramalingam, K., Pazhanivelan, S., & Kaliaperumal, R. (2022). Smart Farming: Internet of Things (IoT)-Based Sustainable Agriculture. *Agriculture*, 12(10), 1745. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101745>
- Divya, K.L., Mhatre, P.H., Venkatasalam, E.P. et al. Crop Simulation Models as Decision-Supporting Tools for Sustainable Potato Production: a Review. *Potato Res.* 64, 387–419 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11540-020-09483-9>
- Duperrin, J. C., & Godet, M. (1973). Matrice d'Impacts croisés multiplication appliquée à un classement. *Rapp. Econ. CEA*, 45, 51.
- Fauzi, A. (2019). Teknik analisis keberlanjutan. Gramedia Pustaka Utama.
- Gao, Y., Alyokhin, A., Prager, S. M., Reitz, S., & Huseth, A. (2025). Complexities in the implementation and maintenance of integrated pest management in potato. *Annual Review of Entomology*, 70(1), 45-63. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120523-023156>
- GODET, M. and BOURSE, F. (1989) MICMAC Ver.6.1.2. Laboratoire d'Investigation en Prospective,
- Napitupulu, D., Rauf, A., Sembiring, M., & Marbun, P. (2024). Physicochemical characteristics of andisols and their correlation to potato yield based on land mapping units. *Comunicata Scientiae*, 16, e4265. <https://doi.org/10.14295/cs.v16.4265>
- Qaim, M. (2020), Role of New Plant Breeding Technologies for Food Security and Sustainable Agricultural Development. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 42: 129-150. <https://doi.org/10.1002/aapp.13044>
- Quirinno, Ratu Syra, Sri Murtiana, and Novky Asmoro. (2024). Peran sektor pertanian dalam meningkatkan ketahanan pangan dan ekonomi nasional. *NUSANTARA: Jurnal Ilmu Pengetahuan Sosial* 11.7, 2811-2822. <https://doi.org/10.31604/nusantara>

- Saiz-Rubio, V., & Rovira-Más, F. (2020). From Smart Farming towards Agriculture 5.0: A Review on Crop Data Management. *Agronomy*, 10(2), 207. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020207>
- Senapaty, M. K., Ray, A., & Padhy, N. (2023). IoT-Enabled Soil Nutrient Analysis and Crop Recommendation Model for Precision Agriculture. *Computers*, 12(3), 61. <https://doi.org/10.3390/computers12030061>
- Stratégie et Organisation (LIPSOR), Paris at www.3ie.fr/lipsor/lipsor_uk/micmac_uk.htm
- Tadele, Z. (2017). Raising Crop Productivity in Africa through Intensification. *Agronomy*, 7(1), 22. <https://doi.org/10.3390/agronomy7010022>
- Wanglin Ma, Dil Bahadur Rahut, Tetsushi Sonobe, Binlei Gong. 2024. Linking farmers to markets: Barriers, solutions, and policy options. *Economic Analysis and Policy*, 82, 1102-1112, <https://doi.org/10.1016/j.eap.2024.05.005>