

Aplikasi Bayesian Networks dalam Evaluasi Tingkat Adopsi Irigasi Tetes

Application of Bayesian Networks for Evaluating the Adoption Rate of Drip Irrigation

Sidik Permana Ali Muhtaj^{1*}, Kudang Boro Seminar², & Elisa Anggraeni²

¹Program Magister Ilmu Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, Sekolah Pasca Sarjana, IPB University, Gedung Sekolah Pascasarjana Lantai II Kampus IPB Baranangsiang Bogor, 16144, Indonesia;

²Departemen Teknik Mesin dan Biosistem IPB, Jalan Lingkar Akademik, Kampus IPB Dramaga, Babakan, Dramaga, Babakan, Kecamatan Dramaga, Kabupaten Bogor, Jawa Barat 16002, Indonesia;

*Penulis korespondensi. *e-mail*: sidik.permana76@gmail.com

(Diterima: 29 Juli 2025 ; Disetujui: 6 Februari 2026)

ABSTRACT

Limited resources, particularly land and water, are considered one of the main challenges in increasing Indonesia's food production. One way to address this is through the use of drip irrigation. Despite its many advantages and widespread use around the world, the adoption rate of drip irrigation in Indonesia remains low. This study aims to explore the issue of adoption by examining Banyuwangi Regency as a case study. Farmers in Banyuwangi Regency were interviewed to understand the factors influencing their adoption of drip irrigation, followed by a diffusion process analysis using a Bayesian Network. The interviews revealed that only 12 out of 92 farmer respondents had adopted drip irrigation. Bayesian Network modeling estimated the probability of adoption at 13.78%. Sensitivity analysis indicated that farmers' financial capacity, the perceived lucrativeness of the technology, and limited access to the technology were among the major factors contributing to the low adoption rate.

Keywords: adoption, bayesian networks, drip irrigation, innovation, technology,

ABSTRAK

Salah satu tantangan dalam meningkatkan produksi pangan di Indonesia adalah terbatasnya sumberdaya, terutama lahan dan air, pada kondisi perubahan iklim. Salah satu bentuk terobosan teknologi adalah irigasi tetes. Meskipun irigasi tetes memiliki banyak keunggulan dan sudah banyak digunakan secara luas di negara lain, tingkat adopsinya di Indonesia masih rendah. Penelitian ini ditujukan untuk menelaah isu tersebut dengan mengambil contoh pada Kabupaten Banyuwangi, sebagai salah satu sentra cabai di Jawa Timur. Pendekatan yang digunakan adalah melalui wawancara petani untuk menelaah faktor-faktor yang mempengaruhi petani pengadopsi, yang dilanjutkan dengan analisis proses difusi menggunakan teknik *Bayesian Networks*. Hasil wawancara menunjukkan hanya 12 dari 92 petani responden yang telah memanfaatkan irigasi tetes. Hasil pemodelan menggunakan *Bayesian Networks* menghasilkan probabilitas petani untuk mengadopsi irigasi tetes di lokasi penelitian hanya 13,78%. Hasil analisis sensitivitas menunjukkan terdapat beberapa faktor penting yang menyebabkan rendahnya angka tersebut, yakni kemampuan finansial petani, keyakinan bahwa teknologi ini dapat meningkatkan pendapatan serta akses teknologi yang rendah.

Kata kunci: adopsi, *bayesian networks*, inovasi, irigasi tetes, teknologi,

PENDAHULUAN

Kebutuhan pangan terus meningkat seiring bertambahnya jumlah penduduk dan pertumbuhan ekonomi. Arifin *et al.* (2019) memperkirakan peningkatan kebutuhan pangan Indonesia rata-rata per tahun antara tahun 1990 hingga 2016 sebesar 4.03%. Peningkatan kebutuhan pangan tersebut jauh di atas pertumbuhan penduduk pada periode yang sama yakni sebesar 1.43% per tahun. Selain pertumbuhan penduduk, peningkatan jumlah kebutuhan pangan tersebut juga dipicu oleh pesatnya pertumbuhan kelas menengah yang mengubah pola diet masyarakat.

Salah satu tantangan dalam meningkatkan produksi pangan di Indonesia adalah terbatasnya sumberdaya. Kompetisi lahan yang makin meningkat mendorong terjadinya konversi lahan pertanian menjadi non-pertanian. Di sisi lain, pembukaan lahan pertanian baru dari lahan hutan juga terbatas karena harus mempertimbangkan daya dukung dan daya tampung lingkungan. Ketersediaan air untuk pertanian juga menjadi tantangan, disebabkan semakin tingginya kompetisi air, terutama dengan meningkatnya kebutuhan air untuk kebutuhan lain seperti permukiman, energi dan industri. Selain itu, faktor-faktor yang dapat memberikan pengaruh negatif pada sektor pertanian seperti bencana alam, perubahan iklim, dan cuaca ekstrem perlu mendapat perhatian lebih besar.

Untuk menghadapi permasalahan dan tantangan tersebut, diperlukan inovasi-inovasi baru, terutama inovasi teknologi pertanian yang dapat meningkatkan produktivitas, lebih efisien dalam penggunaan lahan dan air, serta lebih tangguh terhadap kondisi cuaca dan perubahan iklim. Salah satu bentuk teknologi tersebut adalah irigasi tetes, yakni metode irigasi yang mengirimkan air dalam bentuk tetesan kecil langsung ke zona akar tanaman. Irigasi tetes sangat cocok untuk berbagai jenis tanaman, termasuk tanaman tahunan, sayuran, dan tanaman hortikultura, serta digunakan dalam lanskap, rumah kaca dan kebun rumah. Sistem ini dapat diterapkan pada skala besar maupun

kecil tergantung pada kebutuhan air dan jenis tanaman (FAO *et al.*, 2021). Keunggulan utama irigasi tetes adalah efisiensi penggunaan air yang tinggi. Metode ini mengurangi penguapan dan limpasan air karena air langsung disalurkan ke zona akar, mengurangi pemborosan air secara signifikan (Enciso *et al.*, 2015). Irigasi tetes juga berkontribusi pada peningkatan produktivitas tanaman dengan menyediakan air yang konsisten dan tepat waktu, yang menghindarkan tanaman dari stres air. Air yang diberikan langsung ke akar tanaman meningkatkan penyerapan nutrisi karena nutrisi yang larut dalam air dapat langsung diambil oleh akar, meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk (Enciso *et al.*, 2015).

Dengan tantangan pemenuhan kebutuhan pangan yang makin besar di masa mendatang dan keunggulan irigasi tetes yang besar, adopsi teknologi tersebut perlu terus diperluas. Adopsi teknologi perlu dilakukan melalui pendekatan yang bersifat holistik, yang mengintegrasikan aspek lingkungan, ekonomi, dan sosial untuk mencapai keberlanjutan. Hal ini diwujudkan melalui praktik pertanian berkelanjutan, konservasi sumber daya alam, peningkatan kesejahteraan petani, dan keberlanjutan ekosistem (Muramoto *et al.*, 2014). Melalui pendekatan holistik, diharapkan adopsi teknologi dapat mengarah pada terjadinya difusi sistemik dalam satu masyarakat pada kurun waktu tertentu (Rogers, 1995).

Meskipun memiliki banyak keunggulan, pemanfaatan teknologi irigasi tetes di Indonesia masih sangat rendah. Sampai saat ini, belum ada data resmi yang diterbitkan oleh pemerintah tentang luas lahan yang telah menggunakan irigasi tetes. Indonesia juga tidak pernah melaporkan jumlah penggunaan irigasi tetes kepada *International Commission for Irrigation and Drainage* (ICID), sebagaimana tercermin dalam laporan lembaga tersebut.

Terdapat berbagai kemungkinan yang menyebabkan rendahnya adopsi teknologi tersebut oleh petani di Indonesia. Berdasarkan pengalaman di beberapa negara lain, terdapat beberapa faktor yang dapat menghambat adopsi

teknologi ini, diantaranya biaya awal yang tinggi, kurangnya pengetahuan dan keterampilan petani, akses terbatas terhadap sumber daya air, ketidakpastian manfaat ekonomi, hambatan institusional, dan keterbatasan akses ke kredit (Namara *et al.*, 2007; Postel *et al.*, 2001).

Secara umum, tujuan dari penelitian ini adalah untuk menelaah adopsi teknologi irigasi tetes di tingkat petani. Secara spesifik, penelitian ini melakukan identifikasi dan analisis terhadap faktor-faktor yang mempengaruhi petani untuk

mengadopsi teknologi irigasi tetes, serta menganalisis proses difusi teknologi irigasi tetes yang terjadi pada masyarakat petani.

METODOLOGI

Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di sentra hortikultura Kabupaten Banyuwangi, Jawa Timur, meliputi Kecamatan Kalibaru, Kecamatan Genteng dan Kecamatan Glenmore [Gambar 1].



Gambar 1 Lokasi kajian

Ketiga kecamatan tersebut merupakan kawasan perbukitan dengan variasi lereng yang cukup tinggi, dari landai yang umumnya terdapat di Kecamatan Genteng, sampai wilayah dengan lereng landai yang terbatas di Kecamatan Kalibaru. Di Kecamatan Kalibaru, terdapat kelompok petani yang sudah memanfaatkan teknologi irigasi tetes untuk tanaman cabai seluas sekitar 50 hektar.

Bayesian Network

Model *Bayesian Network* (BN) digunakan untuk menghitung dan menganalisis tingkat adopsi irigasi tetes oleh petani responden di lokasi penelitian. BN digunakan karena kemampuannya untuk merepresentasikan hubungan probabilistik antar sejumlah variabel acak (Pearl, 1988) dan dapat melakukan inferensi probabilistik, yakni menghitung probabilistik satu variabel berdasarkan observasi pada variabel lain (Koller & Friedman, 2009).

Data

Data primer dan sekunder digunakan dalam penelitian ini. Data primer diperoleh melalui pengisian kuesioner dan wawancara kepada responden sesuai dengan peran masing-masing dalam konteks difusi teknologi irigasi tetes. Tabel 1 menyajikan jenis responden dan informasi yang digali.

Tabel 1. Kelompok responden dan topik wawancara

Kelompok Responden	Data/Informasi yang Dikumpulkan
Petani Pengadopsi atau Bukan Pengadopsi Teknologi	<ul style="list-style-type: none"> • Karakteristik petani: umur, jenis kelamin, pendidikan, pendapatan/konsumsi, jumlah anggota rumah tangga, • Karakteristik usaha pertanian: luas lahan, ketersediaan air, luas panen, produksi, pendapatan dari usaha tani. • Pengetahuan tentang irigasi tetes • Interaksi atau jejaring sosial • Khusus untuk pengadopsi: manfaat irigasi tetes, perubahan pendapatan,

Kelompok Responden	Data/Informasi yang Dikumpulkan
Penyedia Teknologi	<p>keuntungan dibandingkan tidak menggunakan teknologi, faktor-faktor yang menjadi pertimbangan dalam mengadopsi teknologi, waktu penggunaan irigasi tetes.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Faktor-faktor penghambat adopsi teknologi • Jenis dan ketersediaan teknologi • Biaya investasi • Fasilitas bagi petani pengguna teknologi • Tantangan atau permasalahan yang dihadapi
Penyuluh Pertanian/ Badan Penyuluh Pertanian/ Dinas Pertanian	<ul style="list-style-type: none"> • Pengalaman dan/atau pengetahuan tentang irigasi tetes. • Program pemerintah dalam memperluas pemanfaatan teknologi. • Peluang dan tantangan dalam adopsi teknologi
Penyalur Kredit	<ul style="list-style-type: none"> • Pengalaman dan/atau pengetahuan tentang irigasi tetes. • Fasilitas kredit yang diberikan. • Apakah kreditur memiliki fasilitas yang berkaitan dengan pengadaan teknologi. • Risiko pengadaan teknologi dari sudut pandang kreditur.

Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini adalah Jumlah Petani atau Rumah Tangga Pertanian (Badan Pusat Statistik) serta Peta Rupa Bumi dari Badan Informasi Geospasial.

Analisis

Tahapan pertama dari analisis adalah evaluasi model awal (*preliminary model*) yang diadopsi dari literatur ilmiah yang tersedia. Model ini selanjutnya diadaptasi untuk kepentingan penelitian ini. Hasil evaluasi selanjutnya dimanfaatkan untuk pengumpulan data lapangan.

Evaluasi data responden dilakukan setelah hasil survei lapangan dinilai lengkap dan mencakup berbagai para pihak yang disasar. Dari data tersebut, dilakukan karakterisasi petani untuk mengetahui berbagai tipologi petani yang ada di wilayah kajian.

Berdasarkan karakteristik petani dan pengamatan lapangan, pemodelan *Bayesian Networks* dilanjutkan dengan modifikasi tertentu. Normalisasi data dilakukan menggunakan pendekatan *min-max normalization*. Pengukuran galat dan analisis sensitivitas selanjutnya dilakukan untuk menguji model dan memahami karakter model secara keseluruhan.

Analisis *Bayesian Networks* dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak Python. Untuk menunjang analisis, beberapa *library* penting digunakan seperti *pandas* dan *numpy* untuk pengontrolan data serta *pgmpy* untuk analisis *Bayesian Networks*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Petani

Secara umum, petani pada lokasi penelitian merupakan petani kecil dengan luas lahan yang relatif sempit. Selain cabai, banyak petani juga menanam tomat dengan metode gilir tanam. Beberapa pertimbangan petani dalam melakukan gilir tanam diantaranya kesehatan tanah, harga komoditas dan kondisi cuaca.

Dari 92 petani responden hanya 12 yang menggunakan irigasi tetes. Para pengguna irigasi tetes melakukan budidaya dengan menyewa lahan, termasuk dari PT New View Glen Falloch, satu perusahaan pemegang Hak Guna Usaha (HGU) pada lahan milik Pemerintah Daerah Kabupaten Banyuwangi. Total luas lahan yang disewa para pengguna irigasi tetes sekitar 50 ha dengan komoditas utama adalah cabai.

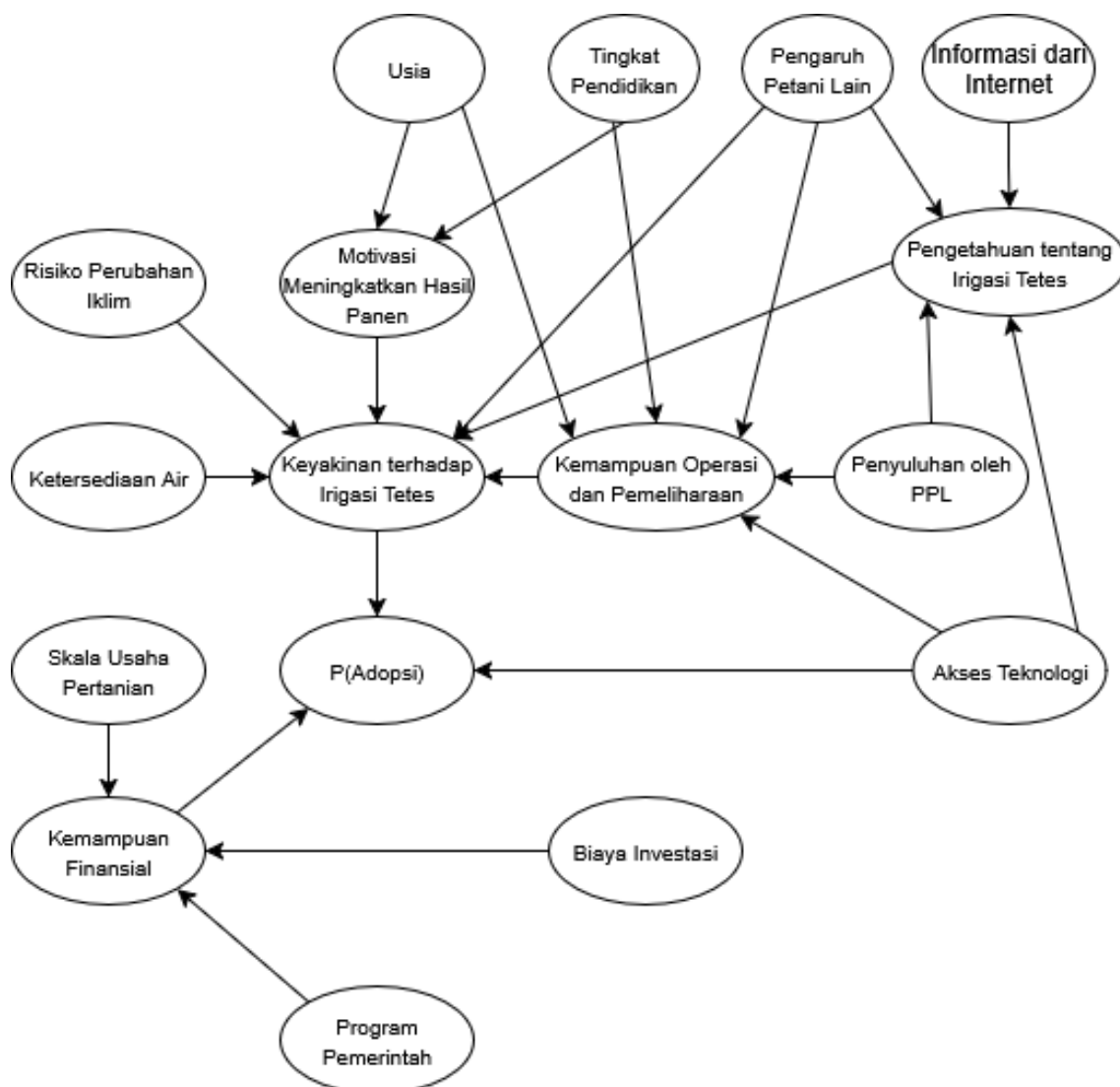
Teknologi irigasi tetes yang digunakan masih cukup sederhana, dan dilakukan secara manual. Namun demikian, petani sudah menggunakan selang *hdpe* yang dibuat khusus untuk irigasi tetes dan berkualitas baik. Untuk investasi peralatan, para pengadopsi mendapat bantuan dari dua petani yang merupakan inovator di lokasi tersebut, yakni Bapak Haji Abbas dan Haji Cholis. Kedua inovator ini memiliki kemampuan finansial yang cukup kuat dengan luas lahan yang memadai. Kedua inovator tersebut menyediakan sebagian peralatan irigasi tetes bagi para petani pengguna lain dengan skema kerjasama bagi hasil. Gambar 2 menyajikan dokumentasi lapangan.

Model *Bayesian Networks*

Pada tahap awal penelitian, dikembangkan *preliminary model* yang diadopsi dari Moglia *et al.* (2016) yang memodelkan proses adopsi teknologi pada petani padi di Laos. Gambar 3 menyajikan model awal yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 2. Lokasi lahan pengguna irigasi tetes



Gambar 4. Model Bayesian Network yang Diperbaharui

Model *Bayesian Networks* menunjukkan 11 *parent node* atau simpul induk dan 6 *child node* atau simpul anak. Tabel 2 menyajikan penjelasan dari masing-masing simpul, status

simpul serta simbolisasi yang digunakan untuk memudahkan proses pemodelan.

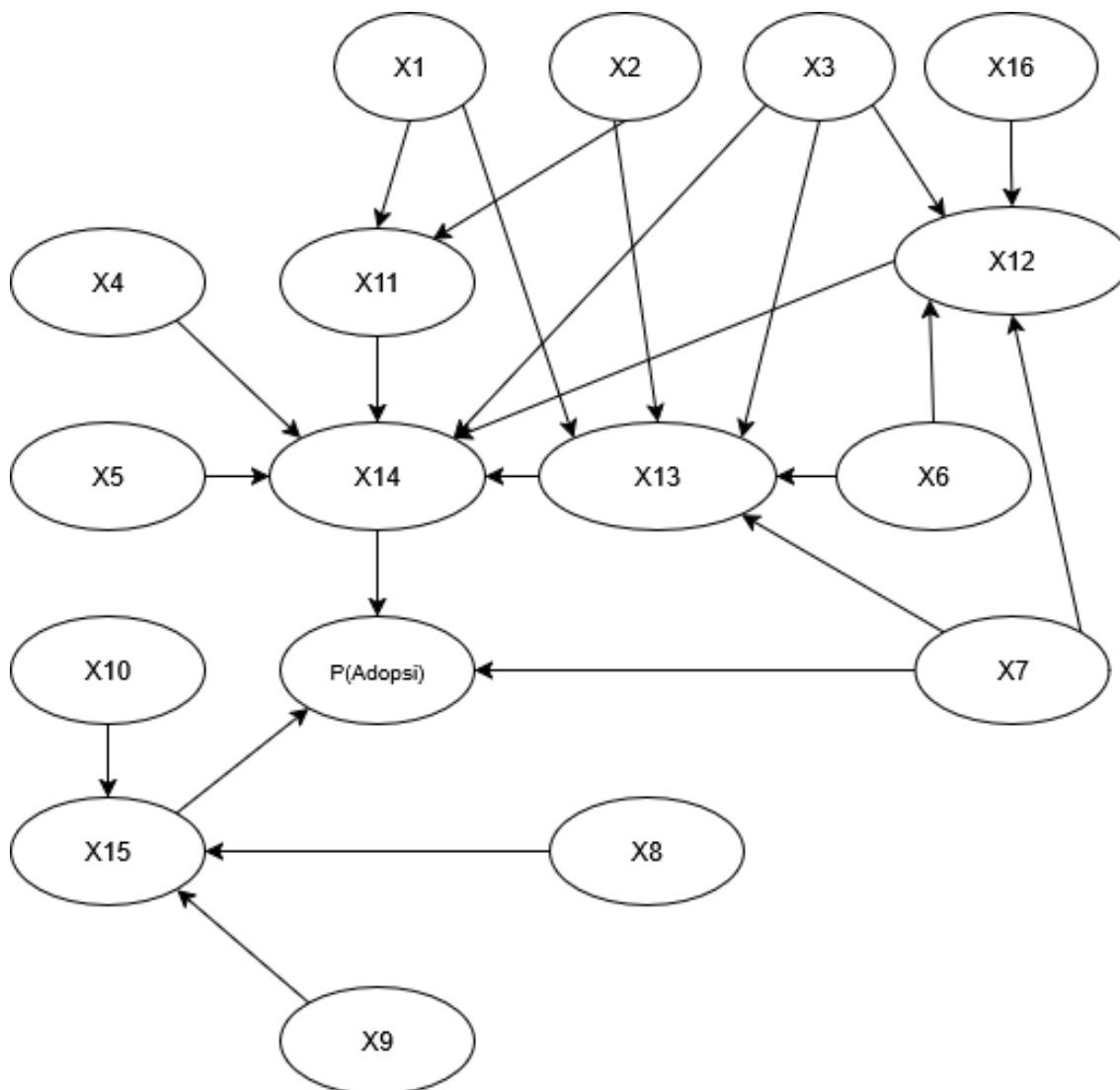
Tabel 2 Penjelasan Simpul yang Digunakan dalam Bayesian Network

Variabel	Parent(P)/Child(C)	Simbol	Penjelasan
Tingkat Pendidikan	P	X_1	Menunjukkan tingkat pendidikan petani.
Usia Petani	P	X_2	Menunjukkan usia petani.
Pengaruh dari Petani Lain	P	X_3	Menunjukkan pengaruh petani lain.
Informasi dari Internet	P	X_{16}	Menunjukkan bagaimana petani mendapatkan informasi dari internet
Risiko Akibat Perubahan Iklim	P	X_4	Menunjukkan risiko perubahan iklim terhadap usaha pertanian. Dalam penelitian ini, risiko yang diperhitungkan adalah ketidakpastian musim yang menyebabkan gagal panen.
Ketersediaan Air	P	X_5	Menunjukkan ketersediaan air dalam usaha pertanian, yang menjadi faktor penting apakah

Variabel	Parent(P)/Child(C)	Simbol	Penjelasan
Penyuluhan oleh PPL	P	X_6	Menunjukkan penyuluhan yang dilakukan oleh petugas penyuluh lapangan (PPL) yang disediakan oleh pemerintah.
Akses Teknologi	P	X_7	Menunjukkan keberadaan dan kegiatan yang dilakukan oleh penyedia layanan irigasi tetes. Termasuk di dalamnya adalah kegiatan demonstrasi, percontohan dan promosi
Biaya Investasi	P	X_8	Menunjukkan biaya investasi yang dibutuhkan untuk membeli dan memasang irigasi tetes.
Program Pemerintah	P	X_9	Menunjukkan program pemerintah tentang irigasi tetes kepada petani.
Skala Usaha Pertanian	P	X_{10}	Menunjukkan skala pertanian yang dijalankan oleh petani. Skala pertanian dalam penelitian ini dilihat dari luas lahan yang diusahakan.
Motivasi Meningkatkan Hasil Panen	C	X_{11}	Menunjukkan keinginan petani untuk meningkatkan hasil panen, baik dari sisi produktivitas maupun kualitas.
Pemahaman tentang Irigasi Tetes	C	X_{12}	Menunjukkan pemahaman petani tentang irigasi tetes, dimulai dari tidak tahu sama sekali hingga paham bagaimana cara kerja irigasi tetes, termasuk manfaat irigasi tetes.
Kemampuan dalam Operasional dan Pemeliharaan	C	X_{13}	Menunjukkan persepsi petani tentang tantangan teknis operasional dan pemeliharaan irigasi tetes.
Keyakinan untuk Menggunakan Irigasi Tetes	C	X_{14}	Menunjukkan keyakinan petani untuk menggunakan irigasi tetes berdasarkan informasi.
Kemampuan Financial	C	X_{15}	Menunjukkan kemampuan keuangan petani untuk membeli dan memasang irigasi tetes.
Adopsi	C	Adopsi	Keputusan petani untuk mengadopsi atau tidak mengadopsi teknologi irigasi tetes

Untuk memudahkan pengembangan model dan analisis, dilakukan simbolisasi terhadap struktur *Bayesian Networks* yang dibangun berdasarkan penjelasan pada Tabel 1.

Struktur *Bayesian Networks* berbasis simbol disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Model Bayesian Networks dengan menggunakan simbol

Berdasarkan struktur *Bayesian Networks* yang telah dikembangkan, berikut ini adalah persamaan dari masing-masing simpul anak yang digunakan:

1. Probabilitas "Motivasi Meningkatkan Hasil Panen" atau X11:

$$P(X11|X1, X2) = \frac{P(X1, X2|X11) \cdot P(X11)}{P(X1, X2)}$$

2. Probabilitas "Pemahaman tentang Irigasi Tetes" atau X12:

$$P(X12|X1, X2, X3, X6, X7, X16) = \frac{P(X1, X2, X3, X6, X7, X16|X12) \cdot P(X12)}{P(X1, X2, X3, X6, X7, X16)}$$

3. Probabilitas "Kemampuan dalam Operasional dan Pemeliharaan" atau X13:

$$P(X13|X1, X2, X3, X6, X7) = \frac{P(X1, X2, X3, X6, X7|X13) \cdot P(X13)}{P(X1, X2, X3, X6, X7)}$$

4. Probabilitas "Keyakinan untuk Menggunakan Irigasi Tetes" atau X14:

$$P(X14|X3, X4, X5, X11, X12, X13) = \frac{P(X3, X4, X5, X11, X12, X13|X14) \cdot P(X14)}{P(X3, X4, X5, X11, X12, X13)}$$

5. Probabilitas "Kemampuan Finansial" atau X15:

$$P(X15|X8, X9, X10) = \frac{P(X8, X9, X10|X15) \cdot P(X15)}{P(X8, X9, X10)}$$

6. Probabilitas "Adopsi":

$$P(Adopsi|X15, X4, X7) = \frac{P(X15, X4, X7|Adopsi) \cdot P(Adopsi)}{P(X15, X4, X7)}$$

Setelah mendefinisikan hubungan setiap simpul, penyiapan data hasil survei sesuai struktur yang dibangun dapat dilaksanakan. Beberapa pertimbangan yang digunakan dalam penyiapan data tersebut, diantaranya adalah: (1) dalam model *Bayesian Networks*, perbedaan jumlah *states* pada masing-masing indikator dimungkinkan; (2) arah dari masing-masing indikator sudah disesuaikan, yakni semakin ke kanan, pengaruh bersifat semakin positif. Pada

Tabel 3 disajikan hasil pengolahan data yang dilakukan:

Tabel 3 Hasil Pengolahan Data untuk Digunakan dalam Model Bayesian Network

Simpul Induk	a	b	c	d	e	f
X1	5	28	29	19	11	
X2	3	10	16	54	9	
X10	7	58	9	6	8	4
X3	51	29				
X16	49	31				
X4	0	1	2	11		
X5	0	0	1	22		
X7	2	2	2	4		
X8	52	1	4	2		
X9	45	13	4	0		
X6	73	8	0	0		

Pada penelitian ini, normalisasi yang digunakan adalah *min-max normalization*,

dengan nilai hasil normalisasi adalah 1. *Laplace smoothing* digunakan untuk mencegah munculnya *state* dengan probabilitas 0 untuk simpul yang menggunakan skala *Likert*, yakni X4, X5, X6, X7, X8 dan X9. Tabel 4 menyajikan hasil normalisasi dan *Laplace smoothing* yang dilakukan.

Tabel 4 tersebut dapat berfungsi sekaligus sebagai *conditional probability distribution* (CPD) dari masing-masing simpul induk. Pada tabel tersebut, *state* dengan nilai 0 mengindikasikan diperlukannya *Laplace smoothing*. Di lain pihak, *state* yang tidak memiliki nilai, akan dikodekan ditulis NaN (*Not a Number*), mengingat prakondisi yang kurang logis atau dengan alasan lainnya. Dalam *Bayesian Networks*, perbedaan jumlah *states* untuk simpul yang digunakan tidak menjadi masalah

Tabel 4 Conditional Probability Distribution (CPD) untuk Simpul Utama

Simpul Induk	a	b	c	d	e	f
X1	0.061856	0.298969	0.309278	0.206186	0.123711	NaN
X2	0.041237	0.113402	0.175258	0.567010	0.103093	NaN
X10	0.081633	0.602041	0.102041	0.071429	0.091837	0.05102
X3	0.634146	0.365854	NaN	NaN	NaN	NaN
X16	0.609756	0.390244	NaN	NaN	NaN	NaN
X4	0.055556	0.111111	0.166667	0.666667	NaN	NaN
X5	0.037037	0.037037	0.074074	0.851852	NaN	NaN
X7	0.214286	0.214286	0.214286	0.357143	NaN	NaN
X8	0.841270	0.031746	0.079365	0.047619	NaN	NaN
X9	0.696970	0.212121	0.075758	0.015152	NaN	NaN
X6	0.870588	0.105882	0.011765	0.011765	NaN	NaN

Dengan mempertimbangkan kombinasi jumlah *state* untuk masing-masing simpul anak yang sangat banyak, penelitian ini melakukan penyederhanaan *state*. Penelitian terdahulu mengimplementasikan pendekatan ini untuk menghadapi data yang kurang lengkap atau struktur yang kompleks (Darwiche, 2009; Koller & Friedman, 2009).

Dalam penelitian ini, jumlah *states* untuk masing-masing simpul anak adalah “*sangat rendah*”, “*rendah*”, “*tinggi*” dan “*sangat tinggi*”, kecuali untuk simpul Adopsi yang hanya terdiri dari dua kondisi (Adopsi dan Tidak Adopsi). Dalam model yang dikembangkan,

digunakan pendekatan *Dirichlet sampling* untuk menghasilkan *Conditional Probability Table* (CPD) pada setiap simpul anak. Nilai P(Adopsi) untuk kombinasi tertentu ditentukan dari hasil propagasi probabilistik yang mempertimbangkan seluruh kemungkinan kombinasi dari simpul induk, bukan hanya nilai maksimum dari tiap variabel. Dengan menggunakan pendekatan tersebut, diperoleh 64 kombinasi probabilitas untuk simpul kemampuan finansial, keyakinan terhadap irigasi tetes, akses teknologi dan adopsi.

Berdasarkan hasil CPD yang dihasilkan, penetapan probabilitas adopsi (P(Adopsi))

sebagai hasil dari keseluruhan proses *Bayesian Networks* yang dikembangkan (Tabel 5).

Tabel 5 Probabilitas Adopsi Irigasi Tetes Hasil Pemodelan

Adopsi	P(Adopsi)
Adopsi (0)/ Tidak Adopsi	0,8622
Adopsi (1)/ Adopsi	0,1378

Hasil penelitian menunjukkan bahwa probabilitas petani yang mengadopsi irigasi tetes hanya 13.78%, sedangkan 86.33% tidak/belum mengadopsi sistem irigasi tersebut. Dengan demikian, berdasarkan hasil inferensi jaringan dapat disimpulkan bahwa adopsi teknologi irigasi tetes di wilayah studi masih sangat rendah. Berdasarkan hasil survei, dari 92 responden, terdapat 12 petani yang sudah menggunakan irigasi tetes, atau 13.04%. Berdasarkan data lapangan tersebut, maka dapat dilakukan validasi model sebagai berikut:

$$\text{galat} = \frac{(0.1378 - 0.1304)}{0.1304} = 0.0567$$

Berbasis hasil validasi tersebut, terdapat galat hasil pemodelan *Bayesian Networks* sebesar 5.67%.

Merujuk pada teori Rogers tentang difusi teknologi, dalam satu populasi, persentase *inovator* dan *pengadopsi awal* masing-masing sekitar 2.5% dan 13.5%, atau secara kumulatif sekitar 16%. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan sebesar 2.22% antara hasil pemodelan dengan teori Rogers tentang Adopsi.

Perbedaan dalam proporsi *inovator* dan *pengadopsi awal* tersebut kemungkinan disebabkan oleh belum selesainya tahapan adopsi oleh *pengadopsi awal* pada populasi petani di lokasi penelitian. Dalam penelitian yang dilakukan Rogers, tahapan *inovator* dan *pengadopsi awal* mengadopsi teknologi biasanya berlangsung selama 1–3 tahun, bergantung pada konteks sosial, akses informasi, pembiayaan dan dukungan kelembagaan. Pada lokasi penelitian, *inovator* mulai menggunakan irigasi tetes dalam bentuk yang sangat sederhana pada tahun 2019, yang diikuti oleh *pengadopsi awal* pada tahun 2022. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan irigasi tetes pada saat penelitian dilakukan sudah

berlangsung selama enam tahun. Kondisi ini menyimpulkan bahwa proses adopsi teknologi irigasi tetes berjalan sangat lambat.

Lambatnya proses adopsi teknologi irigasi tetes pada petani dalam penelitian ini dapat dijelaskan melalui teori Rogers mengenai atribut inovasi, khususnya terkait keunggulan relatif (*relative advantage*) dan kompatibilitas (*compatibility*). Rogers menyatakan bahwa inovasi yang memiliki biaya awal tinggi dan risiko yang besar akan diadopsi lebih lambat jika keunggulan ekonominya tidak segera terlihat jelas oleh pengguna. Dalam kasus ini, petani dengan lahan sempit (< 5.000 m²) yang merupakan mayoritas (68%) merasa teknologi ini tidak ekonomis karena biaya investasi dan operasional dianggap tidak sebanding dengan potensi peningkatan hasil pada skala lahan kecil. Selain itu, inovasi ini kurang memiliki kompatibilitas dengan situasi finansial petani kecil, sehingga menciptakan ketidakpastian (*uncertainty*) yang tinggi mengenai konsekuensi jangka panjang dari penggunaan teknologi tersebut.

Untuk melihat pengaruh indikator dalam *Bayesian Networks* terhadap keputusan petani dalam mengadopsi irigasi tetes, penelitian ini menggunakan analisis sensitivitas, yang disajikan pada Tabel 6. Hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa kemampuan finansial (X15) adalah variabel yang paling sensitif terhadap keputusan untuk menggunakan teknologi irigasi tetes. Dalam model yang dikembangkan, kemampuan finansial sangat dipengaruhi oleh luas lahan yang diusahakan, biaya investasi dan program pemerintah. Simpul selanjutnya yang sensitif terhadap keputusan adopsi adalah keyakinan terhadap teknologi (X14) dan akses teknologi (X7). Sedangkan beberapa variabel seperti pengaruh petani lain (X3) dan akses internet (X16) menunjukkan pengaruh yang sangat kecil (≈ 0). Oleh karena itu, kontribusinya terhadap keputusan adopsi dalam model ini dapat dianggap sangat kecil.

Analisis yang digunakan adalah sensitivitas satu arah, yaitu membandingkan perubahan probabilitas posterior pada simpul target (Adopsi) dalam skenario dimana setiap

simpul lain mengalami perubahan secara individual sementara yang lainnya tetap. Metode ini mirip dengan pendekatan delta probabilitas (Korb & Nicholson, 2010; Uusitalo, 2007)

Tabel 6 Hasil Analisis Sensitivitas Model *Bayesian Network*

Node	Indikator	Nilai
X15	Kemampuan Financial	0.0376
X14	Keyakinan untuk Menggunakan Irigasi Tetes	0.0248
X7	Akses Teknologi	0.0144
X10	Skala Usaha Pertanian	0.0067
X9	Program Pemerintah untuk Penyediaan Kredit	0.0066
X8	Biaya Investasi	0.0042
X13	Kemampuan dalam Operasional dan Pemeliharaan	0.0023
X11	Motivasi Meningkatkan Hasil Panen	0.0008
X1	Tingkat Pendidikan	0.0004
X12	Pemahaman tentang Irigasi Tetes	0.0004
X5	Ketersediaan Air	0.0002
X2	Usia Petani	0.0001
X4	Risiko Akibat Perubahan Iklim	0.0001
X6	Penyuluhan oleh PPL	0.0001
X16	Informasi dari Internet	0.0000
X3	Pengaruh dari Petani Lain	0.0000

Hasil analisis sensitivitas dalam penelitian tersebut menunjukkan bahwa kemampuan finansial (0.0376), keyakinan terhadap teknologi (0.0248), dan akses teknologi (0.0144) adalah tiga indikator utama yang paling berpengaruh terhadap keputusan adopsi petani. Indikator-indikator ini selaras dengan langkah dan syarat adopsi dalam teori Rogers. Kemampuan finansial mencerminkan dimensi ekonomi dari keunggulan relatif (*relative advantage*) dan syarat keterjangkauan inovasi bagi petani kecil atau gurem. Keyakinan petani bahwa teknologi akan meningkatkan pendapatan merupakan elemen kunci pada tahap persuasi, dimana calon pengadopsi membentuk sikap berdasarkan evaluasi subjektif terhadap manfaat inovasi. Sementara itu, akses teknologi yang memfasilitasi aliran informasi dan bantuan teknis menjalankan peran agen perubahan (*change agent*) untuk mengurangi

ketidakpastian petani pada tahap pengetahuan dan implementasi.

Nilai yang dihasilkan pada kolom tabel sensitivitas tersebut memiliki hubungan erat dengan kebutuhan persyaratan teori Rogers karena menunjukkan hierarki faktor penentu yang paling krusial dalam mempercepat laju adopsi. Nilai tertinggi pada faktor finansial mengkonfirmasi pendapat Rogers bahwa inovasi yang membutuhkan biaya awal tinggi akan menjadi hambatan utama jika tidak disertai dengan ketersediaan pembiayaan atau skema kredit yang memadai. Sesuai dengan teori Rogers yang menyatakan bahwa persepsi terhadap atribut inovasi menjelaskan 49% hingga 87% varians dalam laju adopsi, nilai-nilai sensitivitas yang signifikan pada ketiga indikator ini menunjukkan bahwa mereka adalah "pengungkit" utama. Jika nilai probabilitas pada variabel-variabel sensitif ini rendah, maka probabilitas adopsi secara keseluruhan akan tetap rendah, yang menunjukkan bahwa pemenuhan syarat-syarat tersebut adalah keharusan untuk mencapai titik lepas landas (*take-off*) dalam proses difusi.

KESIMPULAN

Adopsi teknologi irigasi tetes di lokasi penelitian masih sangat rendah dengan probabilitas hanya sebesar 13.78%. Faktor-faktor utama yang paling sensitif mempengaruhi keputusan petani adalah kemampuan finansial, keyakinan terhadap manfaat ekonomi teknologi, dan akses terhadap teknologi. Tingginya biaya investasi awal menjadi hambatan terbesar karena dianggap tidak sebanding dengan potensi peningkatan pendapatan pada skala lahan petani kecil yang mayoritas menguasai lahan kurang dari 0.5 ha.

Proses difusi teknologi irigasi tetes berjalan sangat lambat dan belum mencapai titik lepas landas (*take-off point*). Tingkat adopsi kumulatif saat ini (13.78%) masih berada di bawah ambang batas kritis 16% yang diperlukan untuk mengaktifkan jejaring interpersonal secara luas menurut teori Rogers. Dibutuhkan waktu hingga enam tahun bagi teknologi ini

untuk bergeser dari tahap inovator ke pengadopsi awal, yang menunjukkan adanya kendala sistemik dalam penyebaran informasi dan dukungan pembiayaan di masyarakat petani.

Indikator sensitivitas menunjukkan bahwa perbaikan pada akses teknologi dan skema pembiayaan merupakan pengungkit utama untuk mendorong petani melewati tahap persuasi dan implementasi. Tanpa intervensi pada faktor-faktor sensitif tersebut, probabilitas adopsi akan tetap rendah karena inovasi dianggap kurang memiliki keunggulan relatif dan kompatibilitas dengan situasi finansial petani kecil atau gurem.

DAFTAR PUSTAKA

- Alisjahbana, A. S., & Murniningtyas, E. (2018). *Tujuan Pembangunan Berkelanjutan di Indonesia: Konsep, Target dan Strategi Implementasi* (Ed ke-2 ed.). Bandung: UNPAD Press.
- Arifin, B., Achsan, N. A., Martianto, D., Sari, L. K., & Firdaus, A. H. (2019). The future of Indonesian food consumption. *Jurnal Ekonomi Indonesia*, 8(1), 71-102. doi:10.52813/jei.v8i1.13
- Calogero Carletto, Angeli Kirk, Paul Winters, Benjamin Davis. (2007). "Non-Traditional Crops, Traditional Constraints: The Adoption and Diffusion of Cash Crops among Smallholders in Guatemala,.
- Chai Q, Gan Y, Zhao C, Xu H-L, Waskom RM, Niu Y, Siddique KHM. (2016). Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. *Agron Sustain Dev* . (2016) 36: 3. doi:10.1007/s13593-015-0338-6.
- Darwiche, A. (2009). *Modeling and Reasoning with Bayesian Networks*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Enciso, J., Jifon, J., Anciso, J., & Ribera, L. (2015). Productivity of Onions Using Subsurface Drip Irrigation versus Furrow Irrigation Systems with an Internet Based Irrigation Scheduling Program. *International Journal of Agronomy*, 2015(1), 178180. doi:10.1155/2015/178180
- FAO. (2018). Guidelines on irrigation investment projects. Rome: FAO.
- FAO. (2020). Irrigation in Africa in figures – AQUASTAT Survey 2020. <https://www.fao.org/3/cb0872en/CB0872EN.pdf>.
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP, & WHO. (2021). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2021. Transforming food systems for food security, improved nutrition and affordable healthy diets for all*. Rome: FAO.
- International Water Management Institute (IWMI). (2012). Water Policy Briefing: Smallholder drip irrigation. (33). https://www.iwmi.cgiar.org/Publications/Water_Policy_Briefs/wpb33.pdf.
- International Water Management Institute (IWMI). (2019). IWMI Strategy 2019-2023: innovative water solutions for sustainable development. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI).
- Koller, D., & Friedman, N. (2009). *Probabilistic Graphical Models: Principles and Techniques*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Korb, K. B., & Nicholson, A. E. (2010). *Bayesian Artificial Intelligence* (Second Edition ed.). Boca Raton, FL: Chapman and Hall/CRC.
- Meijer SS, Catacutan D, Ajayi OC, Sileshi GW, Nieuwenhuis M. (2015). The role of knowledge, attitudes and perceptions in the uptake of agricultural and agroforestry innovations among smallholder farmers in sub-Saharan Africa. *Int J Agric Sustain*. 13(1):40–54. doi:10.1080/14735903.2014.912493.
- Moglia, M., Alexander, K., & Connell, J. (2016). *Developing a Bayesian Network model to describe technology adoption by rice farmers in Southern Laos*. Clayton South, Victoria, Australia: CSIRO.
- Muramoto, J., Gliessman, S. R., Koike, S. T., Shennan, C., Bull, C. T., Klonsky, K., & Swezey, S. (2014). Integrated Biological and Cultural Practices Can Reduce Crop Rotation Period of Organic Strawberries. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 38(5), 603-631. doi:10.1080/21683565.2013.878429
- Namara, R. E., Nagar, R. K., & Upadhyay, B. (2007). Economics, adoption determinants, and impacts of micro-irrigation technologies: empirical results from India. *Irrigation Science*, 25(3), 283-297. doi:10.1007/s00271-007-0065-0
- Namara RE, Upadhyay B, Nagar RK. (2005). Adoption and Impacts of Microirrigation Technologies: Empirical Results from Selected Localities of Maharashtra and Gujarat States of India. (93). https://www.iwmi.cgiar.org/Publications/Working_Papers/working/WOR93.pdf.
- Oster E, Thornton R. (2012). Determinants of technology adoption: Peer effects in menstrual cup take-up. *J Eur Econ Assoc*. 10(6):1263–1293. doi:10.1111/j.1542-4774.2012.01090.x.

- Postel, S., Polak, P., Gonzales, F., & Keller, J. (2001). Drip Irrigation for Small Farmers. *Water International*, 26(1), 3-13. doi:10.1080/02508060108686882
- Rogers, E. M. (1995). *Diffusion of innovations* (Ed ke-3 ed.). New York: Free Press of Glencoe.
- Selvaraju R. (2012). Climate risk assessment and management in agriculture. Di dalam: *Building Resilience For Adaptation To Climate Change In The Agriculture Sector*. Rome: FAO.
- Uusitalo, L. (2007). Advantages and challenges of Bayesian networks in environmental modelling. *Ecological Modelling*, 203(3), 312-318. doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.11.033
- World Bank. (2000). *World Development Report 2000/2001 : Attacking Poverty*. New York: Oxford University Press @World Bank.
- World Bank. (2007). *World Development Report 2008*. Washington, DC: World Bank.
- Zeng X, Fu Z, Deng X, Xu D. (2021). The impact of livelihood risk on farmers of different poverty types: Based on the study of typical areas in sichuan province. *Agriculture (Switzerland)*.11(8):1–18. doi:10.3390/agriculture11080768