

BAB II.

TINJAUAN PUSTAKA DAN KERANGKA PEMIKIRAN

2.1. Penelitian Terdahulu

Kajian mengenai adopsi teknologi Pengendalian Hama Terpadu telah menjadi fokus penelitian yang intensif dalam dua dekade terakhir, seiring dengan meningkatnya kesadaran global tentang pentingnya sistem pertanian berkelanjutan dan dampak negatif dari penggunaan pestisida sintetis yang berlebihan. Tinjauan komprehensif terhadap literatur ilmiah mengidentifikasi berbagai pendekatan metodologis, fokus penelitian, dan temuan empiris yang memberikan fondasi teoretis dan metodologis untuk penelitian ini. Sepuluh penelitian terdahulu yang paling relevan dengan topik penelitian ini akan diuraikan secara detail untuk memberikan perspektif yang komprehensif tentang keadaan pengetahuan dalam bidang adopsi PHT.

1. Sari, Fatchiya, dan Tjitropranoto (2016) melakukan penelitian tentang tingkat penerapan PHT sayuran di Kenagarian Koto Tinggi, Kabupaten Agam, Sumatera Barat dengan menggunakan metode survei deskriptif pada 90 responden petani. Penelitian ini menggunakan kerangka adopsi yang mengkategorikan implementasi PHT menjadi tiga komponen utama: pemanfaatan musuh alami, budidaya tanaman terpadu, dan pengamatan berkala. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat penerapan komponen pemanfaatan musuh alami sebesar 53,05% responden dalam kategori rendah, komponen budidaya tanaman secara keseluruhan sebesar 62,78% dalam kategori cukup sesuai dengan rekomendasi, dan komponen pengamatan berkala tergolong sedang dan tinggi sebesar 77,78%. Temuan penting dari penelitian ini adalah bahwa adopsi PHT bersifat parsial dan heterogen, dimana petani cenderung mengadopsi komponen yang dipersepsikan sebagai berisiko rendah dan lebih sesuai dengan praktik yang sudah ada. Penelitian ini juga mengidentifikasi peran penyuluh sebagai faktor krusial dalam memfasilitasi adopsi, namun kualitas dan intensitas penyuluhan masih menjadi kendala utama. Keterbatasan penelitian ini

adalah ruang lingkup yang terbatas pada satu lokasi dan kurangnya analisis dampak, sehingga tidak memberikan bukti tentang manfaat adopsi (Sari et al., 2016).

2. Latifah dkk. (2018) melakukan uji teknis dan ekonomis komponen pengendalian hama penyakit terpadu pada usahatani tomat dengan menggunakan desain eksperimental yang membandingkan dua paket PHT: paket pemanfaatan Bakteri Pemacu Pertumbuhan Tanaman (PGPR) dan paket pemanfaatan mikroorganisme lokal, dengan kebiasaan petani konvensional sebagai kontrol. Penelitian ini dilaksanakan di Kabupaten Kediri dengan menggunakan desain uji coba terkontrol teracak pada lahan seluas 0,5 hektar untuk setiap perlakuan. Hasil pengkajian menunjukkan bahwa pertumbuhan tanaman dan produksi tomat yang menggunakan PGPR menghasilkan hasil paling tinggi (45,2 ton/ha) dibandingkan dengan mikroorganisme lokal (38,7 ton/ha) dan kontrol (32,1 ton/ha). Tingkat serangan hama dan penyakit pada kedua paket PHT relatif lebih rendah, dengan intensitas serangan untuk trips sebesar 12,3% pada PGPR dan 15,7% pada MOL dibandingkan 28,9% pada kontrol. Analisis ekonomi menunjukkan bahwa rasio B/C untuk PGPR adalah 2,8, MOL 2,4, dan kontrol 1,9, mengindikasikan kinerja ekonomi yang superior dari adopsi PHT. Kontribusi penting dari penelitian ini adalah demonstrasi empiris tentang keunggulan teknis dan ekonomi dari PHT, serta analisis perbandingan antara paket PHT yang berbeda. Namun, penelitian ini terbatas pada satu tanaman dan satu musim, sehingga keberlanjutan dan kemampuan transfer temuan perlu investigasi lebih lanjut (Latifah et al., 2018).
3. Prabaningrum (2008) meneliti penerapan teknologi PHT untuk mengendalikan organisme pengganggu utama pada budidaya paprika dengan menggunakan metode petak berpasangan di Balai Penelitian Tanaman Sayuran Lembang. Penelitian ini merupakan penelitian di stasiun dengan tingkat kontrol yang tinggi yang memungkinkan pengukuran yang presisi terhadap efek teknologi. Komponen teknologi PHT yang dirakit

terdiri dari pelepasan predator *Menochilus sexmaculatus* (1 ekor/tanaman, 1 kali/minggu), penyemprotan *Verticillium lecanii* (3×10^8 spora/ml, 1 kali/minggu), dan penggunaan pestisida selektif berdasarkan ambang pengendalian. Teknologi konvensional menggunakan aplikasi pestisida terjadwal berdasarkan praktik petani lokal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan teknologi PHT dapat mengurangi penggunaan pestisida sebesar 84,60% dalam hal frekuensi dan 76,3% dalam hal bahan aktif yang diaplikasikan. Kandungan residu pestisida pada buah paprika dapat ditekan hingga di bawah batas maksimum residu (BMR) yang ditetapkan ($<0,01$ ppm untuk imidakloprid dan $<0,05$ ppm untuk fenarimol), sedangkan pada perlakuan konvensional residu insektisida Imidakloprid (0,08 ppm) dan fungisida Fenarimol (0,12 ppm) melampaui nilai BMR. Kinerja hasil pada perlakuan PHT tidak berbeda signifikan dengan konvensional (28,4 ton/ha vs 29,1 ton/ha), mengindikasikan bahwa pengurangan pestisida tidak mengorbankan produktivitas. Penelitian ini memberikan bukti kuat tentang manfaat lingkungan dan keamanan pangan dari PHT tanpa penurunan produktivitas, namun aplikabilitas untuk kondisi lahan dengan keterbatasan sumber daya perlu validasi lebih lanjut (Prabaningrum, 2008).

4. Salaki, Situmorang, dan Sembiring (2017) melakukan program pengabdian masyarakat tentang PHT pada tanaman sayuran di Kota Tomohon dengan pendekatan partisipatif melalui penyuluhan dan pelatihan kepada 60 peserta yang terdiri dari siswa dan pengurus pesantren. Program ini menggunakan pendekatan pembelajaran orang dewasa dengan kombinasi sesi di kelas, pelatihan praktik langsung, dan demonstrasi lapangan. Kegiatan meliputi penyuluhan tentang konsep PHT, pelatihan pembuatan pestisida nabati dari bahan lokal, pengamatan hama tanaman, dan pembentukan petak percontohan. Penilaian sebelum-sesudah menunjukkan peningkatan signifikan dalam skor pengetahuan dari rata-rata 4,2 menjadi 7,8 (skala 1-10), skor keterampilan dari 3,1 menjadi 6,9, dan skor sikap dari 5,6 menjadi 8,3. Survei tindak lanjut setelah 6 bulan menunjukkan bahwa 73% peserta telah mengimplementasikan setidaknya beberapa praktik PHT dalam

kegiatan pertanian mereka. Faktor-faktor yang mendukung implementasi meliputi dukungan sebaya, bantuan teknis berkelanjutan, dan ketersediaan bahan lokal untuk pestisida nabati. Hambatan yang diidentifikasi meliputi keterbatasan waktu, biaya awal untuk beberapa input, dan tantangan pasar untuk produk premium. Kontribusi penting dari penelitian ini adalah demonstrasi pendekatan penyuluhan partisipatif yang efektif dan pentingnya pembelajaran berbasis masyarakat untuk adopsi teknologi. Namun, skala implementasi masih terbatas dan keberlanjutan jangka panjang dari praktik-praktik tersebut memerlukan pemantauan lebih lanjut (Salaki et al., 2017).

5. Mariyono (2017) menganalisis dampak sosial ekonomi dari pengelolaan penyakit terpadu untuk budidaya cabai di Brebes dan Magelang, Jawa Tengah, dengan menggunakan desain kuasi-eksperimental dan pencocokan skor kecenderungan untuk mengatasi bias seleksi. Penelitian ini melibatkan 480 petani cabai yang terdiri dari 240 adopter dan 240 non-adopter yang dipilih menggunakan sampling acak berstrata. Paket IDM yang dievaluasi meliputi penggunaan varietas tahan, aplikasi *Trichoderma* sp., rotasi tanaman, dan penggunaan pestisida selektif. Data dikumpulkan melalui wawancara terstruktur, diskusi kelompok terfokus, dan observasi lapangan selama dua musim tanam. Hasil analisis menunjukkan bahwa adopsi IDM meningkatkan hasil rata-rata sebesar 23% (dari 8,2 ton/ha menjadi 10,1 ton/ha), mengurangi biaya produksi sebesar 18% terutama dari pengurangan penggunaan pestisida, dan meningkatkan pendapatan bersih sebesar 34%. Analisis risiko menunjukkan bahwa adopsi IDM juga mengurangi variabilitas hasil sebesar 28%, mengindikasikan perbaikan manajemen risiko. Analisis dekomposisi mengidentifikasi bahwa peningkatan hasil sebagian besar disebabkan oleh pengurangan kehilangan tanaman dari penyakit (60%) dan perbaikan kesehatan tanaman dari input biologis (40%). Analisis intensitas adopsi menunjukkan bahwa adopter lengkap memperoleh manfaat yang lebih besar dibandingkan adopter parsial, menyoroti pentingnya pendekatan paket. Faktor-faktor yang mempengaruhi

- adopsi meliputi tingkat pendidikan, pengalaman bertani, akses ke penyuluhan, dan keanggotaan kelompok. Penelitian ini memberikan bukti kuat tentang dampak positif dari pendekatan terpadu dan pentingnya mengatasi intensitas adopsi, bukan hanya tingkat adopsi (Mariyono, 2017).
6. Kassie, Shiferaw, dan Muricho (2011) melakukan analisis dampak adopsi praktik pertanian berkelanjutan, termasuk PHT, terhadap pendapatan tanaman dan pengentasan kemiskinan di Uganda dengan menggunakan data survei rumah tangga berskala besar dari 2.300 petani kecil. Penelitian ini menggunakan model regresi multinomial dengan perpindahan endogen untuk menghitung pilihan teknologi ganda dan potensi endogenitas. Paket SAP yang dianalisis meliputi konservasi tanah, penggunaan pupuk organik, benih unggul, dan praktik PHT. Pola adopsi menunjukkan bahwa 34% petani mengadopsi praktik tunggal, 28% mengadopsi kombinasi praktik, dan 38% tidak mengadopsi SAP apa pun. Tingkat adopsi PHT sebesar 31% dengan adopsi yang lebih tinggi di antara petani laki-laki, petani berpendidikan, dan petani dengan akses ke layanan penyuluhan. Analisis dampak menunjukkan bahwa adopsi PHT meningkatkan pendapatan tanaman sebesar 41% dan mengurangi probabilitas kemiskinan sebesar 15 poin persentase. Analisis dekomposisi mengidentifikasi bahwa keuntungan pendapatan dari PHT terutama berasal dari perbaikan hasil (55%) dan penghematan biaya (45%). Analisis efek perlakuan heterogen menunjukkan bahwa manfaat lebih besar untuk petani kecil dan rumah tangga yang dikepalai perempuan, mengindikasikan dampak pro-miskin. Simulasi kebijakan menunjukkan bahwa peningkatan layanan penyuluhan dapat meningkatkan tingkat adopsi sebesar 45% dan mengurangi kemiskinan pedesaan sebesar 8 poin persentase. Penelitian ini memberikan bukti meyakinkan tentang potensi pengurangan kemiskinan dari praktik pertanian berkelanjutan dan menyoroti pentingnya menargetkan populasi rentan (Kassie et al., 2011).
 7. Pemsil, Waibel, dan Gutierrez (2005) melakukan evaluasi dampak sekolah lapang petani (FFS) pada penggunaan pestisida dan efisiensi teknis dalam

produksi padi di Vietnam dengan menggunakan analisis frontier stokastik dan model efek perlakuan. Penelitian ini melibatkan 940 petani padi dari 8 provinsi dengan 470 lulusan FFS dan 470 petani kontrol yang dipilih menggunakan teknik pencocokan. Program FFS berlangsung selama 16 minggu dengan fokus pada prinsip PHT, ekologi hama, dan keterampilan pengambilan keputusan. Data produksi dikumpulkan untuk 3 musim berturut-turut untuk menangkap efek pembelajaran dan keberlanjutan. Hasil menunjukkan bahwa partisipasi FFS menurunkan penggunaan pestisida sebesar 46% dalam hal kuantitas dan 35% dalam hal nilai, tanpa efek buruk pada hasil. Skor efisiensi teknis meningkat dari rata-rata 0,73 untuk kelompok kontrol menjadi 0,84 untuk lulusan FFS. Analisis dekomposisi mengidentifikasi bahwa keuntungan efisiensi terutama berasal dari perbaikan alokasi input (60%) dan waktu operasi yang lebih baik (40%). Analisis kurva pembelajaran menunjukkan bahwa manfaat FFS meningkat seiring waktu, dengan dampak maksimum tercapai pada musim ketiga setelah kelulusan. Analisis efek spillover menunjukkan eksternalitas positif kepada petani tetangga, dengan pengurangan penggunaan pestisida sebesar 18% di antara non-peserta dalam desa yang sama. Analisis biaya-manfaat menunjukkan bahwa program FFS sangat efektif biaya dengan rasio manfaat-biaya sebesar 4,2 selama periode 5 tahun. Penelitian ini memberikan bukti kuat tentang efektivitas pendekatan pendidikan petani dan pentingnya proses pembelajaran dalam adopsi teknologi (Pemsl et al., 2005).

8. Dasgupta, Meisner, dan Huq (2005) menganalisis dampak kesehatan dan manfaat ekonomi dari adopsi PHT dalam produksi sayuran di Bangladesh dengan menggunakan survei kesehatan rumah tangga dan analisis ekonomi. Penelitian ini dimotivasi oleh kekhawatiran tentang insiden keracunan pestisida di antara petani dan konsumen. Data dikumpulkan dari 1.200 petani sayuran dan 3.600 anggota rumah tangga melalui survei kesehatan, pemeriksaan medis, dan kuesioner ekonomi. Praktik PHT yang dievaluasi meliputi pengendalian biologis, praktik budidaya, varietas tahan, dan

penggunaan pestisida selektif. Penilaian dampak kesehatan menggunakan metode epidemiologis dengan kontrol untuk faktor perancu. Hasil menunjukkan bahwa adopsi PHT mengurangi insiden keracunan pestisida akut sebesar 67% di antara petani dan 45% di antara anggota keluarga. Penilaian efek kesehatan kronis menunjukkan berkurangnya gejala masalah neurologis, gangguan kulit, dan masalah pernapasan di antara adopter PHT. Valuasi ekonomi manfaat kesehatan menggunakan biaya medis yang dihindari dan kehilangan produktivitas menunjukkan manfaat sebesar \$156 per rumah tangga per tahun. Analisis ekonomi pertanian menunjukkan bahwa adopsi PHT juga meningkatkan pendapatan bersih usahatani sebesar \$89 per rumah tangga per tahun melalui pengurangan biaya input dan premi kualitas. Total manfaat ekonomi dari adopsi PHT sebesar \$245 per rumah tangga per tahun, merepresentasikan peningkatan 23% dalam total pendapatan rumah tangga. Analisis kebijakan menunjukkan bahwa investasi dalam program penyuluhan PHT dapat menghasilkan rasio manfaat-biaya sebesar 6,8 ketika manfaat kesehatan dimasukkan dalam analisis. Penelitian ini menyoroti pentingnya mempertimbangkan eksternalitas kesehatan dalam evaluasi teknologi dan memberikan kasus yang meyakinkan untuk investasi publik dalam pertanian berkelanjutan (Dasgupta et al., 2005).

9. Koirala, Mishra, dan Mohanty (2016) menganalisis dampak adopsi pengelolaan hama terpadu pada efisiensi teknis dan kinerja lingkungan dalam produksi jagung di Amerika Serikat dengan menggunakan fungsi jarak terarah dan metodologi penilaian siklus hidup. Penelitian ini menggunakan dataset komprehensif dari 2.856 petani jagung yang berpartisipasi dalam Survei Manajemen Sumber Daya Pertanian USDA. Adopsi PHT diukur menggunakan indeks komposit yang mencakup pengintaian, ambang ekonomi, pengendalian biologis, praktik budidaya, dan penggunaan pestisida selektif. Analisis efisiensi teknis menggunakan analisis amplop data dengan output lingkungan sebagai output yang tidak diinginkan. Penilaian dampak lingkungan menggunakan kerangka penilaian siklus hidup untuk mengkuantifikasi jejak karbon, potensi polusi air, dan

dampak keanekaragaman hayati. Hasil menunjukkan bahwa adopsi PHT meningkatkan skor efisiensi teknis rata-rata sebesar 12% dan skor efisiensi lingkungan sebesar 18%. Jejak karbon per unit output jagung menurun sebesar 15% untuk adopter PHT, potensi polusi air menurun sebesar 22%, dan skor dampak keanekaragaman hayati meningkat sebesar 16%. Analisis ekonomi menunjukkan bahwa adopsi PHT meningkatkan margin keuntungan sebesar 8% melalui kombinasi penghematan biaya dan perbaikan efisiensi. Analisis regional menunjukkan bahwa manfaat adopsi PHT bervariasi di berbagai zona agroekologis, dengan manfaat yang lebih tinggi di daerah dengan tekanan hama yang tinggi. Analisis simulasi kebijakan menunjukkan bahwa insentif keuangan untuk adopsi PHT dapat menjadi strategi yang efektif biaya untuk mencapai tujuan lingkungan dalam pertanian. Penelitian ini memberikan bukti komprehensif tentang manfaat lingkungan dari adopsi PHT dan mendemonstrasikan metodologi untuk analisis ekonomi-lingkungan terpadu (Koirala et al., 2016).

10. Sharma dan Peshin (2016) melakukan tinjauan sistematis dan meta-analisis tentang determinan adopsi PHT secara global dengan menganalisis 127 studi dari 35 negara yang diterbitkan antara 1990-2015. Meta-analisis ini menggunakan model efek acak untuk mensintesis temuan di berbagai studi dan konteks. Faktor-faktor yang dianalisis dikategorikan menjadi karakteristik petani, karakteristik usahatani, karakteristik teknologi, faktor institusional, dan faktor pasar. Hasil menunjukkan bahwa pendidikan (rasio odds = 1,67), pengalaman bertani (OR = 1,23), ukuran usahatani (OR = 1,45), akses penyuluhan (OR = 2,34), dan keanggotaan kelompok (OR = 1,89) adalah prediktor positif paling konsisten dari adopsi PHT di seluruh studi. Kompleksitas teknologi (OR = 0,68) dan biaya awal (OR = 0,72) adalah hambatan paling signifikan. Analisis regional menunjukkan bahwa determinan bervariasi di berbagai wilayah geografis dan konteks pembangunan. Negara berkembang menunjukkan efek yang lebih kuat untuk akses penyuluhan dan keanggotaan kelompok, sementara negara maju menunjukkan efek yang lebih kuat untuk insentif ekonomi dan kesadaran

lingkungan. Analisis jenis tanaman menunjukkan bahwa pola adopsi berbeda antara tanaman tahunan dan tanaman tahunan, dengan tingkat adopsi yang lebih tinggi untuk sayuran dan buah-buahan bernilai tinggi. Analisis temporal menunjukkan meningkatnya pentingnya faktor pasar dan kesadaran lingkungan dalam studi-studi terbaru. Penilaian kualitas menggunakan kriteria yang ditetapkan mengidentifikasi kebutuhan untuk desain studi yang lebih ketat dan evaluasi dampak jangka panjang. Penelitian ini memberikan sintesis komprehensif bukti global dan mengidentifikasi kesenjangan penelitian yang perlu diatasi dalam studi-studi masa depan (Sharma & Peshin, 2016).

Tinjauan terhadap sepuluh penelitian terdahulu mengidentifikasi beberapa wawasan kunci yang relevan untuk penelitian ini. Pertama, adopsi PHT umumnya bersifat parsial dan bertahap, dengan petani cenderung mengadopsi komponen yang dipersepsikan sebagai berisiko rendah dan lebih sesuai dengan praktik yang ada. Kedua, bukti konsisten menunjukkan dampak positif dari adopsi PHT pada hasil ekonomi, lingkungan, dan kesehatan, meskipun besaran dampak bervariasi di seluruh konteks. Ketiga, determinan adopsi relatif konsisten di seluruh studi, dengan pendidikan, akses penyuluhan, dan jaringan sosial sebagai faktor pendukung utama. Keempat, metodologi dalam studi yang ada bervariasi luas, dengan kebutuhan untuk desain eksperimental yang lebih ketat dan evaluasi jangka panjang. Kelima, sebagian besar studi fokus pada tanaman tunggal atau musim tunggal, dengan bukti terbatas tentang keberlanjutan dan kemampuan transfer temuan. Penelitian ini akan mengatasi beberapa kesenjangan ini dengan menggunakan pendekatan komprehensif, berbagai tanaman, dan cakrawala waktu yang lebih panjang untuk analisis.

2.2. Tinjauan Pustaka

2.2.1. Konsep Pengendalian Hama Terpadu (PHT)

Pengendalian Hama Terpadu (PHT) atau Integrated Pest Management (IPM) merupakan paradigma revolusioner dalam pengelolaan hama yang menandai transformasi fundamental dari pendekatan simplistik dan reaktif menuju sistem

holistik dan proaktif dalam manajemen agroekosistem. Konsep PHT pertama kali dikembangkan pada dekade 1950-an sebagai respons terhadap masalah yang muncul dari penggunaan pestisida sintetis yang intensif, termasuk fenomena resistensi hama, resurgensi hama sekunder, terbunuhnya organisme bukan sasaran, dan akumulasi residu kimia dalam lingkungan. Rachel Carson dalam bukunya "Silent Spring" (1962) memberikan peringatan dini tentang konsekuensi ekologis dari penggunaan pestisida berlebihan, yang kemudian memicu pengembangan pendekatan alternatif yang lebih berkelanjutan dan ramah ekologi (Carson, 1962; Kogan, 1998).

Definisi klasik PHT menurut Organisasi Pangan dan Pertanian (FAO) adalah "sistem pengelolaan populasi hama yang menggunakan semua teknik dan metode yang sesuai dengan cara yang sekompatibel mungkin, dan mempertahankan populasi hama di bawah tingkat yang menyebabkan kerusakan ekonomi". Definisi ini kemudian berkembang menjadi lebih komprehensif dengan memasukkan dimensi keberlanjutan ekologis, kelayakan ekonomi, dan penerimaan sosial. Definisi kontemporer yang dikembangkan oleh Organisasi Internasional untuk Pengendalian Biologis (IOBC) menekankan PHT sebagai "strategi pengelolaan hama yang menggunakan kombinasi teknik biologis, budidaya, fisik, dan kimia secara kompatibel untuk mempertahankan populasi hama di bawah ambang ekonomi dengan meminimalkan risiko terhadap kesehatan manusia, lingkungan, dan organisme bukan sasaran" (FAO, 2017; Barzman et al., 2015).

Filosofi dasar PHT dibangun atas beberapa prinsip fundamental yang membedakannya dari pendekatan konvensional. Pertama, prinsip pencegahan yang menekankan bahwa pencegahan lebih efektif dan ekonomis dibandingkan dengan perlakuan setelah masalah terjadi. Implementasi prinsip ini meliputi penggunaan varietas tahan atau toleran, praktik budidaya yang menciptakan kondisi tidak menguntungkan untuk perkembangan hama, sanitasi lahan, dan pengaturan waktu tanam yang optimal. Kedua, prinsip pemantauan yang mengharuskan pengamatan rutin dan sistematis terhadap populasi hama, musuh alami, dan kondisi lingkungan untuk membuat keputusan yang tepat. Pemantauan bukan sekedar menghitung hama, tetapi memahami dinamika ekosistem dan memprediksi masalah potensial.

Ketiga, prinsip ambang intervensi yang menetapkan bahwa tindakan pengendalian hanya dilakukan ketika populasi hama mencapai level yang dapat menyebabkan kerusakan ekonomi yang melebihi biaya pengendalian (Pedigo & Rice, 2009; Ehler, 2006).

Komponen-komponen PHT diorganisir dalam sistem hierarkis dimana pengendalian biologis mendapat prioritas tertinggi, diikuti oleh pengendalian budidaya dan mekanis, dengan pengendalian kimia sebagai pilihan terakhir yang digunakan secara selektif dan terarah. Pengendalian biologis mencakup konservasi musuh alami, augmentasi melalui pelepasan berkala, dan pengendalian biologis klasik untuk hama introduksi. Musuh alami termasuk predator, parasitoid, dan entomopatogen yang dapat dikembangkan melalui manajemen habitat, penyediaan mangsa atau inang alternatif, dan pengurangan dampak pestisida. Pengendalian budidaya meliputi rotasi tanaman, tumpangsari, tanaman penutup, varietas tahan, manipulasi tanggal tanam, dan sanitasi lapangan yang dirancang untuk mengganggu siklus hidup hama dan meningkatkan ketahanan tanaman. Pengendalian mekanis dan fisik mencakup perangkap, penghalang, mulsa, olah tanah, dan penghilangan secara mekanis yang dapat efektif untuk situasi hama tertentu (van Emden & Service, 2004; Dhaliwal et al., 2010).

Penggunaan pestisida dalam kerangka PHT diatur oleh kriteria ketat yang menekankan selektivitas, kompatibilitas dengan agens pengendalian biologis, manajemen resistensi, dan keamanan lingkungan. Pemilihan pestisida harus mempertimbangkan spektrum aktivitas, persistensi, toksisitas terhadap organisme bukan sasaran, dan potensi untuk pengembangan resistensi. Waktu aplikasi ditentukan berdasarkan biologi hama, ambang ekonomi, dan keberadaan musuh alami. Strategi manajemen resistensi meliputi rotasi cara kerja yang berbeda, penggunaan campuran atau urutan, pemeliharaan refugia, dan integrasi dengan metode non-kimia. Pertimbangan pengelolaan lingkungan meliputi pencegahan drift, perlindungan air, dan minimisasi residu (Sparks & Nauen, 2015; Gould et al., 2018).

Fondasi ekologis PHT didasarkan pada pemahaman tentang fungsi agroekosistem, konservasi keanekaragaman hayati, dan penyediaan jasa ekosistem. Agroekosistem yang sehat dicirikan oleh keanekaragaman hayati tinggi, jaring makanan kompleks, hubungan hama-musuh alami yang stabil, dan ketahanan terhadap gangguan. Praktik PHT dirancang untuk meningkatkan jasa ekosistem seperti pengendalian biologis, penyerbukan, siklus nutrisi, dan pembentukan tanah sambil mempertahankan produktivitas pertanian. Pertimbangan tingkat lanskap meliputi penciptaan koridor, restorasi habitat, dan koordinasi lintas usahatani untuk memaksimalkan manfaat ekologis. Implikasi perubahan iklim memerlukan strategi PHT adaptif yang memperhitungkan pergeseran distribusi hama, perubahan fenologi, dan kejadian cuaca ekstrem (Altieri, 1999; Bianchi et al., 2006).

Prinsip ekonomi dalam PHT fokus pada efektivitas biaya, manajemen risiko, dan keberlanjutan jangka panjang sistem pertanian. Konsep ambang ekonomi memerlukan pemahaman tentang fungsi kerusakan, biaya pengendalian, dan harga pasar untuk mengoptimalkan keputusan intervensi. Penilaian risiko mencakup pertimbangan probabilitas kehilangan hasil, volatilitas harga, dan ketidakpastian dalam dinamika populasi hama. Manfaat ekonomi jangka panjang dari PHT meliputi pengurangan biaya pestisida, perbaikan kualitas produk, akses pasar untuk produk premium, dan penghindaran biaya eksternal dari kerusakan lingkungan. Analisis ekonomi harus mempertimbangkan baik manfaat pribadi kepada petani maupun manfaat sosial kepada masyarakat, termasuk jasa lingkungan dan perbaikan kesehatan masyarakat (Zadoks, 1989; Zilberman et al., 1991).

Implementasi PHT memerlukan integrasi pengetahuan yang canggih, keterampilan pengambilan keputusan, dan kemampuan manajemen adaptif. Petani memerlukan pemahaman tentang biologi hama, ekologi musuh alami, fisiologi tanaman, dan pengaruh cuaca untuk membuat keputusan manajemen yang tepat. Sistem pendukung keputusan dapat membantu petani mengintegrasikan informasi kompleks dan memprediksi hasil dari berbagai pilihan manajemen. Program pelatihan harus mengatasi baik pengetahuan teknis maupun keterampilan pengambilan keputusan melalui pendekatan pembelajaran eksperiensial. Pembelajaran berkelanjutan dan adaptasi sangat penting karena situasi hama terus

berkembang dan teknologi baru menjadi tersedia (Morse & Buhler, 1997; Norton & Mullen, 1994).

2.2.2. Komponen Teknologi PHT pada Sayuran Dataran Rendah

Implementasi PHT pada sayuran dataran rendah melibatkan orkestrasi dari berbagai komponen yang saling berinteraksi dan saling memperkuat dalam menciptakan kondisi yang tidak menguntungkan untuk perkembangan hama sambil mempromosikan organisme yang menguntungkan dan kesehatan tanaman. Kompleksitas sistem produksi sayuran, dengan keragaman tanaman yang tinggi, musim tanam yang pendek, manajemen intensif, dan nilai ekonomi tinggi, memerlukan pendekatan PHT yang canggih yang dapat beradaptasi dengan kondisi yang berubah cepat dan memenuhi persyaratan kualitas yang ketat. Setiap komponen PHT memiliki peran spesifik dalam sistem keseluruhan, namun efektivitas maksimal tercapai melalui integrasi strategis dan interaksi sinergis antar komponen (Zehnder et al., 2007; Shelton & Badenes-Perez, 2006).

1. Pengendalian Hayati (Biological Control)

Komponen pengendalian biologis dalam sistem PHT sayuran mencakup tiga kategori utama: pengendalian biologis konservasi, pengendalian biologis augmentatif, dan pengendalian biologis klasik. Pengendalian biologis konservasi fokus pada penciptaan dan pemeliharaan habitat yang mendukung populasi musuh alami melalui manipulasi habitat, selektivitas pestisida, dan penyediaan sumber daya esensial. Strip bunga, bank kumbang, dan pagar hidup dapat menyediakan sumber nektar, tempat hibernasi, dan mangsa alternatif untuk serangga yang menguntungkan. Penggunaan pestisida selektif kritis untuk melestarikan populasi musuh alami, memerlukan pemilihan senyawa, waktu aplikasi, dan formulasi yang cermat untuk meminimalkan dampak pada organisme yang menguntungkan. Pengendalian biologis augmentatif melibatkan pelepasan berkala musuh alami yang dikembangkan secara massal untuk melengkapi populasi yang ada atau memperkenalkan agens pengendalian biologis spesifik. Ketersediaan komersial predator seperti *Phytoseiulus persimilis* untuk pengendalian tungau laba-laba, *Orius insidiosus*

untuk manajemen trips, dan *Aphidius colemani* untuk penekanan kutu daun telah membuat pengendalian biologis augmentatif praktis untuk banyak sistem sayuran (van Lenteren et al., 2018; Gurr et al., 2017).

Pengendalian biologis mikroba menggunakan bakteri entomopatogenik, jamur, virus, dan nematoda menawarkan keuntungan spesifik untuk produksi sayuran, khususnya dalam sistem rumah kaca dimana kondisi lingkungan dapat dikontrol. Strain *Bacillus thuringiensis* memberikan pengendalian selektif larva lepidoptera tanpa mempengaruhi serangga yang menguntungkan. Jamur entomopatogenik seperti *Beauveria bassiana* dan *Metarhizium anisopliae* dapat efektif terhadap berbagai hama serangga dalam kondisi kelembaban yang sesuai. Biopestisida yang diturunkan dari sumber botani, seperti neem, piretrum, dan minyak esensial, menawarkan profil toksisitas yang lebih rendah dan kekhawatiran residu yang berkurang dibandingkan pestisida sintetis. Integrasi berbagai agens pengendalian biologis memerlukan pemahaman tentang kompatibilitas, waktu, dan potensi interaksi untuk menghindari efek antagonis dan memaksimalkan dampak kumulatif (Lacey et al., 2015; Chandler et al., 2011).

2. Pengendalian Budidaya (Cultural Control)

Praktik budidaya membentuk fondasi sistem PHT dengan memberikan pengelolaan hama jangka panjang dan efektif biaya yang terintegrasi dengan mulus dengan operasi pertanian normal. Rotasi tanaman adalah praktik budidaya fundamental yang memutus siklus hidup hama, mengurangi populasi patogen tular tanah, dan mengganggu hubungan inang-hama. Skema rotasi yang efektif untuk sayuran memerlukan pemahaman tentang kisaran inang hama, mekanisme bertahan hidup, dan dinamika populasi. Rotasi dengan tanaman bukan inang, tanaman penutup, atau periode bera dapat secara signifikan mengurangi tekanan hama pada tanaman berikutnya. Namun, dalam sistem sayuran intensif dengan lahan terbatas dan tuntutan pasar, pilihan rotasi mungkin terbatas, memerlukan pendekatan kreatif seperti rotasi temporal, rotasi strip, atau tumpangsari (Altieri, 1995; Liebman & Dyck, 1993).

Pemilihan varietas dan pemuliaan tanaman untuk ketahanan hama merupakan landasan pengelolaan hama berkelanjutan. Mekanisme ketahanan meliputi antibiosis (efek buruk pada perkembangan hama), antixenosis (tidak disukai oleh hama), dan toleransi (kemampuan untuk bertahan terhadap kerusakan tanpa kehilangan hasil). Program pemuliaan modern memanfaatkan baik teknik pemuliaan konvensional maupun pendekatan bioteknologi untuk mengembangkan varietas tahan. Seleksi berbantuan penanda mempercepat proses pemuliaan dengan memungkinkan deteksi dini gen ketahanan. Strategi penyebaran untuk varietas tahan harus mempertimbangkan daya tahan resistensi, piramida gen ketahanan ganda, dan integrasi dengan komponen PHT lainnya untuk mencegah kerusakan resistensi. Manajemen aliran gen dan strategi refugia penting untuk mempertahankan efektivitas resistensi (Smith, 2005; Gould, 1998).

Manipulasi waktu tanam dapat menjadi alat yang kuat untuk menghindari populasi hama puncak atau menyinkronkan kerentanan tanaman dengan periode aktivitas musuh alami yang tinggi. Penanaman awal atau akhir dapat membantu tanaman menghindari tahap hama kritis, khususnya untuk hama dengan jendela aktivitas temporal yang sempit. Namun, keputusan waktu tanam harus menyeimbangkan penghindaran hama dengan kendala iklim, waktu pasar, dan ketersediaan tenaga kerja. Tanaman perangkap dapat mengalihkan hama dari tanaman utama, menyediakan area terpusat untuk pemantauan atau pengendalian terfokus. Strategi dorong-tarik menggabungkan tanaman penolak dan penarik untuk memanipulasi perilaku hama dan mengurangi kerusakan. Tumpangsari dengan tanaman pendamping yang sesuai dapat memberikan penekanan hama, habitat untuk organisme menguntungkan, dan manfaat diversifikasi (Hooks & Johnson, 2003; Khan et al., 2010).

3. Pengendalian Mekanis dan Fisik (Mechanical and Physical Control)

Metode pengendalian mekanis dan fisik menawarkan pilihan pengelolaan hama langsung bebas residu yang sangat berharga dalam sistem organik atau periode pra-panen ketika penggunaan pestisida dibatasi. Penutup baris dan layar menyediakan penghalang fisik yang mengecualikan hama terbang sambil

memungkinkan penetrasi cahaya, udara, dan air. Bahan-bahan ini harus dipilih dengan cermat berdasarkan ukuran mata jaring, daya tahan, dan sifat transmisi cahaya. Waktu instalasi dan penghapusan kritis untuk memaksimalkan manfaat sambil menghindari interferensi dengan penyerbukan atau serangga menguntungkan. Mulsa reflektif dapat mengusir serangga terbang tertentu, khususnya kutu daun dan trips, sambil juga memberikan manfaat penekanan gulma dan konservasi kelembaban (Vincent et al., 2003; Summers et al., 2004). Sistem perangkap melayani berbagai fungsi dalam program PHT, termasuk pemantauan, perangkap massal, dan gangguan kawin. Perangkap pemantauan memberikan peringatan dini kedatangan hama, melacak tren populasi, dan memandu keputusan intervensi. Pemilihan perangkap memerlukan pemahaman tentang perilaku hama, penarik yang tepat, dan strategi penempatan optimal. Perangkap massal dapat memberikan pengendalian hama langsung untuk tanaman bernilai tinggi atau sistem organik dimana pilihan lain terbatas. Perangkap feromon sangat efektif untuk hama lepidoptera, dengan keberhasilan bergantung pada kepadatan perangkap, kualitas penarik, dan waktu penyebaran. Perangkap lengket menggunakan kartu berwarna memanfaatkan respons visual hama dan dapat efektif untuk serangga terbang kecil. Pemeliharaan perangkap, pencatatan data, dan interpretasi memerlukan pelatihan dan konsistensi untuk memberikan informasi yang dapat diandalkan (El-Sayed et al., 2006; Witzgall et al., 2010).

Praktik olah tanah dapat mengganggu siklus hidup hama, menghancurkan tahap hibernasi, dan menciptakan kondisi yang tidak menguntungkan untuk hama yang hidup di tanah. Waktu olah tanah kritis untuk menargetkan tahap hama yang rentan sambil meminimalkan gangguan pada organisme tanah yang menguntungkan. Pembajakan dalam dapat mengubur tahap hama atau memaparkannya pada predasi dan kondisi cuaca yang merugikan. Namun, olah tanah harus diseimbangkan dengan tujuan konservasi tanah dan mungkin tidak sesuai dalam semua sistem. Strategi mulsa menggunakan bahan organik atau sintetis dapat menciptakan penghalang untuk hama tertentu sambil

memberikan manfaat tambahan seperti konservasi kelembaban, moderasi suhu, dan penekanan gulma (Sánchez-Moreno & Ferris, 2007; Tillman et al., 2004).

4. Pengendalian Kimia Selektif (Selective Chemical Control)

Pengendalian kimia dalam konteks PHT menekankan selektivitas, presisi, dan integrasi dengan komponen lain daripada aplikasi berbasis kalender dari pestisida spektrum luas. Pestisida selektif menargetkan kelompok hama spesifik sambil memiliki dampak minimal pada organisme menguntungkan, memerlukan pemahaman tentang cara kerja, profil selektivitas, dan teknik aplikasi. Pestisida biorasional, termasuk pengatur pertumbuhan serangga, peniru hormon, dan turunan botani, menawarkan profil selektivitas yang lebih baik dibandingkan bahan spektrum luas konvensional. Manajemen resistensi adalah komponen kritis dari strategi pengendalian kimia, memerlukan rotasi cara kerja yang berbeda, penggunaan campuran, dan integrasi dengan metode non-kimia (Sparks & Nauen, 2015; Casida & Durkin, 2013).

Teknologi aplikasi dan waktu sangat penting untuk memaksimalkan efektivitas sambil meminimalkan dampak lingkungan. Teknik aplikasi presisi, termasuk teknologi tingkat variabel, penempatan terfokus, dan optimisasi penetrasi kanopi, dapat meningkatkan efisiensi pestisida dan mengurangi deposisi di luar sasaran. Adjuvan semprot dapat meningkatkan penyerapan, retensi, dan aktivitas biologis sambil berpotensi mengurangi dosis yang diperlukan. Waktu aplikasi berdasarkan biologi hama, kondisi cuaca, dan keberadaan organisme menguntungkan memerlukan sistem pengambilan keputusan dan pemantauan yang canggih. Aplikasi berbasis ambang menggantikan penyemprotan kalender dengan keputusan berbasis sains yang mempertimbangkan dampak ekonomi dan kondisi lingkungan (Hewitt et al., 2009; Miller & Ellis, 2000).

5. Integrasi dan Sinergi Antar Komponen

Keberhasilan sistem PHT bergantung pada integrasi yang cermat dari semua komponen untuk menciptakan efek sinergis yang melebihi jumlah komponen individual. Integrasi memerlukan pemahaman tentang interaksi antara taktik yang berbeda, pertimbangan waktu, dan potensi konflik atau komplementaritas. Beberapa kombinasi jelas sinergis, seperti pengendalian

biologis konservasi yang ditingkatkan dengan penggunaan pestisida selektif. Yang lain mungkin memerlukan sekuensing atau pemisahan spasial yang cermat untuk menghindari interaksi negatif. Pendekatan pemikiran sistem membantu mengidentifikasi titik leverage dimana perubahan kecil dapat memiliki dampak besar dalam efektivitas pengelolaan hama keseluruhan (Lewis et al., 1997; Kogan, 1998).

Prinsip manajemen adaptif sangat penting untuk sistem PHT karena situasi hama terus berkembang, teknologi baru menjadi tersedia, dan kondisi lingkungan berubah. Sistem pemantauan dan evaluasi harus melacak tidak hanya tingkat hama tetapi juga populasi yang menguntungkan, pengembangan resistensi, dampak lingkungan, dan hasil ekonomi. Mekanisme umpan balik memungkinkan perbaikan berkelanjutan dalam strategi manajemen berdasarkan data kinerja dan keadaan yang berubah. Sistem pendukung keputusan dapat membantu mengintegrasikan informasi kompleks dan memandu respons adaptif terhadap kondisi yang berubah (Norton & Mumford, 1993; Zalucki et al., 2009).

2.2.3. Teori Adopsi Inovasi

Teori adopsi inovasi merupakan kerangka teoretis yang kompleks dan multidimensional untuk memahami bagaimana individu, organisasi, dan masyarakat mengadopsi ide, praktik, atau teknologi baru. Dalam konteks adopsi teknologi pertanian, teori ini telah berkembang dari model linier sederhana menuju kerangka yang canggih yang mengakui kompleksitas proses pengambilan keputusan, heterogenitas adopter, dan sifat dinamis sistem inovasi. Pemahaman proses adopsi fundamental untuk merancang strategi efektif untuk mempromosikan praktik pertanian berkelanjutan seperti PHT, karena memberikan wawasan tentang mengapa beberapa petani mengadopsi inovasi dengan cepat sementara yang lain enggan untuk berubah, dan faktor apa yang dapat dimanfaatkan untuk mempercepat adopsi (Rogers, 2003; Feder et al., 1985).

Karya seminal Everett Rogers tentang difusi inovasi memberikan kerangka dasar untuk memahami bagaimana inovasi menyebar melalui sistem sosial dari

waktu ke waktu. Model ini mengidentifikasi empat elemen kunci: inovasi, saluran komunikasi, waktu, dan sistem sosial. Karakteristik inovasi yang mempengaruhi tingkat adopsi meliputi keuntungan relatif (manfaat yang dipersepsikan dibandingkan praktik yang ada), kompatibilitas (konsistensi dengan nilai dan praktik yang ada), kompleksitas (kesulitan pemahaman dan penggunaan), kemampuan dicoba (kemampuan untuk bereksperimen dengan inovasi), dan kemampuan diamati (visibilitas hasil kepada orang lain). Kategori adopter—inovator, adopter awal, mayoritas awal, mayoritas akhir, dan laggard—mencerminkan profil psikologis yang berbeda dan pola waktu adopsi. Saluran komunikasi memfasilitasi aliran informasi dan pengaruh, dengan saluran interpersonal lebih efektif untuk persuasi sementara saluran media massa lebih baik untuk menciptakan kesadaran (Rogers, 2003).

Proses adopsi melibatkan lima tahap berurutan: pengetahuan (kesadaran tentang inovasi), persuasi (pembentukan sikap), keputusan (komitmen untuk mengadopsi atau menolak), implementasi (menggunakan inovasi), dan konfirmasi (penguatan keputusan adopsi). Proses ini tidak selalu linier, dengan kemungkinan penghentian, penemuan kembali, atau adopsi parsial pada berbagai tahap. Dimensi waktu mencakup periode keputusan inovasi, kategorisasi adopter berdasarkan waktu relatif, dan tingkat adopsi dalam sistem sosial. Karakteristik sistem sosial, termasuk norma, struktur jaringan, dan pola kepemimpinan opini, secara signifikan mempengaruhi pola difusi. Namun, teori difusi klasik telah dikritik karena terlalu deterministik, individualistik, dan tidak cukup memperhitungkan kendala struktural atau dinamika kekuasaan (Valente, 1995; Dearing, 2009).

Model Penerimaan Teknologi (TAM) dan ekstensinya memberikan perspektif psikologis tentang adopsi teknologi dengan fokus pada kepercayaan, sikap, dan niat perilaku individu. TAM asli mengusulkan bahwa adopsi teknologi ditentukan oleh kegunaan yang dipersepsikan (tingkat dimana seseorang percaya teknologi akan meningkatkan kinerja) dan kemudahan penggunaan yang dipersepsikan (tingkat dimana seseorang percaya teknologi akan bebas usaha). Persepsi ini mempengaruhi sikap terhadap teknologi, yang pada gilirannya mempengaruhi niat perilaku dan penggunaan aktual. Versi yang diperluas

menggabungkan faktor tambahan seperti pengaruh sosial, kondisi yang memfasilitasi, dan efek pengalaman. Teori Terpadu Penerimaan dan Penggunaan Teknologi (UTAUT) mengintegrasikan elemen dari berbagai model untuk memberikan kerangka yang lebih komprehensif (Davis, 1989; Venkatesh et al., 2003).

Dalam konteks pertanian, TAM telah diadaptasi untuk memperhitungkan karakteristik spesifik keputusan pertanian, termasuk pertimbangan risiko, konsekuensi jangka panjang, dan pengaruh sosial. Risiko yang dipersepsikan menjadi sangat penting mengingat ketidakpastian dalam produksi pertanian dan konsekuensi potensial dari kegagalan teknologi. Pengaruh sosial melalui jaringan sebaya, efek demonstrasi, dan layanan penyuluhan memainkan peran penting dalam membentuk persepsi dan sikap. Efek pengalaman melalui belajar dengan melakukan, belajar dengan mengamati, dan belajar dengan berinteraksi dengan agen penyuluhan atau peneliti mempengaruhi keputusan penggunaan berkelanjutan (Adrian et al., 2005; Pierpaoli et al., 2013).

Teori ekonomi fokus pada proses pengambilan keputusan rasional dimana petani menimbang manfaat yang diharapkan terhadap biaya adopsi. Teori utilitas yang diharapkan mengasumsikan bahwa petani adalah maksimalis utilitas yang diharapkan yang menghindari risiko yang mempertimbangkan baik rata-rata pengembalian maupun variabilitas ketika membuat keputusan adopsi. Adopsi terjadi ketika utilitas yang diharapkan dari teknologi baru melebihi praktik yang ada. Faktor-faktor yang mempengaruhi utilitas yang diharapkan meliputi profitabilitas teknologi, karakteristik risiko, preferensi risiko petani, dan kendala seperti akses kredit atau keamanan kepemilikan lahan. Variabel modal manusia seperti pendidikan dan pengalaman mempengaruhi kemampuan untuk mengevaluasi teknologi dan mengimplementasikannya secara efektif (Feder et al., 1985; Just & Zilberman, 1983).

Teori opsi riil mengakui bahwa keputusan adopsi sering melibatkan investasi yang tidak dapat diubah dalam ketidakpastian, menciptakan nilai opsi untuk menunda adopsi sampai informasi yang lebih baik tersedia. Ini menjelaskan mengapa teknologi yang tampaknya menguntungkan mungkin tidak segera

diadopsi, karena petani menunggu resolusi ketidakpastian atau mengamati pengalaman orang lain. Model pembelajaran menggabungkan aspek dinamis dimana petani memperbaiki kepercayaan tentang kinerja teknologi berdasarkan pengalaman mereka sendiri dan pengamatan orang lain. Efek jaringan terjadi ketika manfaat teknologi meningkat dengan jumlah adopter, menciptakan loop umpan balik positif yang dapat menyebabkan adopsi cepat setelah massa kritis tercapai (Dixit & Pindyck, 1994; Stoneman, 2002).

Wawasan ekonomi perilaku mengungkapkan bahwa keputusan adopsi tidak murni rasional tetapi dipengaruhi oleh bias psikologis, preferensi sosial, dan keterbatasan kognitif. Penghindaran kerugian menunjukkan bahwa petani mungkin enggan untuk meninggalkan praktik yang familiar bahkan ketika teknologi baru menawarkan pengembalian yang diharapkan superior. Bias status quo dan efek endowment menciptakan inersia yang mendukung praktik saat ini. Efek framing berarti bahwa bagaimana informasi tentang teknologi disajikan dapat mempengaruhi keputusan adopsi independen dari konten aktual. Akuntansi mental dapat menyebabkan petani memperlakukan aliran pendapatan yang berbeda atau kategori biaya secara berbeda, mempengaruhi evaluasi teknologi (Kahneman, 2011; Duflo et al., 2011).

Preferensi sosial, termasuk timbal balik, kekhawatiran keadilan, dan identitas sosial, mempengaruhi keputusan adopsi dalam konteks komunitas. Petani mungkin dipengaruhi oleh apa yang mereka anggap sebagai perilaku yang adil atau tepat dalam kelompok sosial mereka. Pembelajaran sosial melalui pengamatan pengalaman orang lain dapat menyebabkan perilaku mengikuti dimana petani mengadopsi teknologi karena orang lain melakukannya, terlepas dari keadaan individu. Kepercayaan pada sumber informasi, termasuk agen penyuluhan, peneliti, dan rekan, secara signifikan mempengaruhi evaluasi teknologi dan adopsi. Nilai budaya mengenai tradisi, pengelolaan lingkungan, atau solidaritas komunitas dapat memfasilitasi atau menghambat adopsi teknologi tertentu (Bandiera & Rasul, 2006; Wejnert, 2002).

Keputusan adopsi tertanam dalam konteks institusional yang dapat memfasilitasi atau membatasi adopsi teknologi. Keamanan hak properti mempengaruhi insentif untuk investasi jangka panjang dalam teknologi baru. Ketidaksempurnaan pasar kredit dapat mencegah petani yang terbatas secara finansial dari mengadopsi teknologi yang intensif modal. Ketersediaan pasar input dan output mempengaruhi profitabilitas dan kelayakan teknologi. Kualitas dan aksesibilitas sistem penyuluhan menentukan aliran informasi dan ketersediaan dukungan teknis. Lingkungan kebijakan, termasuk subsidi, regulasi, dan standar, dapat secara signifikan mempengaruhi insentif adopsi (Feder & Umali, 1993; Besley & Case, 1993).

Modal sosial dalam bentuk jaringan, asosiasi, dan hubungan kepercayaan memfasilitasi pertukaran informasi, tindakan kolektif, dan pembagian risiko yang dapat mempromosikan adopsi teknologi. Organisasi petani dapat menyediakan platform untuk pembelajaran, pengadaan input, pemasaran output, dan pengumpulan risiko. Namun, jaringan sosial juga dapat melanggengkan praktik yang tidak optimal jika anggota yang berpengaruh menolak perubahan. Struktur kekuasaan dalam komunitas dapat mencegah kelompok tertentu dari mengakses teknologi atau mendapat manfaat dari adopsi. Gender, usia, etnis, atau status sosial ekonomi dapat menciptakan akses diferensial atau hambatan adopsi (Narayan & Pritchett, 1999; Woolcock & Narayan, 2000).

Pengakuan heterogenitas adopter telah menyebabkan pengembangan strategi penargetan yang mengidentifikasi petani yang paling mungkin mendapat manfaat dari teknologi atau paling mungkin mempengaruhi orang lain. Tipologi petani berdasarkan sumber daya, preferensi risiko, orientasi pasar, atau gaya belajar dapat memandu strategi penyuluhan. Pendekatan petani pemimpin memanfaatkan jaringan sosial dengan mengidentifikasi dan bekerja secara intensif dengan petani berpengaruh yang dapat mendemonstrasikan teknologi kepada orang lain. Strategi segmentasi pasar mengakui bahwa segmen petani yang berbeda mungkin memerlukan paket teknologi atau strategi promosi yang berbeda. Penyuluhan presisi menggunakan analitik data untuk menargetkan petani spesifik dengan

informasi dan rekomendasi yang disesuaikan (Anderson & Feder, 2007; Doss, 2006).

Penelitian terbaru mengakui bahwa adopsi bukan biner tetapi melibatkan pertanyaan tentang intensitas (seberapa banyak teknologi yang diadopsi), kualitas (seberapa baik teknologi diimplementasikan), dan keberlanjutan (apakah adopsi berlanjut dari waktu ke waktu). Adopsi parsial dapat mencerminkan ketidakdapat dibagi teknologi, proses pembelajaran, atau adaptasi optimal untuk kondisi spesifik. Penghentian adopsi dapat disebabkan oleh pengalaman awal yang buruk, keadaan yang berubah, atau alternatif yang lebih baik menjadi tersedia. Adopsi berkelanjutan memerlukan manfaat berkelanjutan, dukungan teknis, dan adaptasi terhadap kondisi yang berubah (Feder & Umali, 1993; Neill & Lee, 2001).

Pendekatan sistem inovasi pertanian mengakui bahwa adopsi terjadi dalam sistem kompleks yang melibatkan berbagai aktor, institusi, dan aliran pengetahuan. Inovasi dipandang sebagai proses interaktif yang melibatkan petani, peneliti, agen penyuluhan, pemasok input, pengolah, dan pembuat kebijakan. Keberhasilan bergantung pada koordinasi dan kolaborasi di antara aktor-aktor ini. Kegagalan sistem seperti hubungan yang lemah, mekanisme umpan balik yang tidak memadai, atau insentif yang tidak selaras dapat menghambat adopsi. Platform inovasi yang mempertemukan berbagai pemangku kepentingan dapat memfasilitasi pembelajaran, pemecahan masalah, dan tindakan kolektif (Klerkx et al., 2012; Spielman et al., 2009).

2.2.4. Efisiensi Usahatani

Konsep efisiensi dalam usahatani merupakan prinsip fundamental dalam ekonomi pertanian yang mengukur seberapa baik petani menggunakan sumber daya yang tersedia untuk menghasilkan output pertanian. Analisis efisiensi memberikan wawasan kritis tentang kinerja operasi pertanian, potensi untuk perbaikan, dan dampak teknologi baru atau kebijakan pada produktivitas pertanian. Dalam konteks adopsi PHT, analisis efisiensi sangat relevan karena PHT menjanjikan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya melalui aplikasi input yang lebih presisi, pengurangan pemborosan, dan peningkatan sinergi antar komponen

produksi yang berbeda. Pemahaman konsep efisiensi dan metode pengukuran sangat penting untuk mengevaluasi dampak sebenarnya dari adopsi PHT dan mengidentifikasi peluang untuk perbaikan lebih lanjut (Coelli et al., 2005; Kumbhakar & Lovell, 2000).

Konsep efisiensi dibangun atas teori produksi yang menggambarkan hubungan antara input dan output dalam proses produksi. Frontier produksi mewakili output maksimum yang mungkin yang dapat diproduksi dari sekumpulan input yang diberikan dengan teknologi dan pengetahuan saat ini. Farrell (1957) mengidentifikasi tiga jenis efisiensi: efisiensi teknis (kemampuan untuk menghasilkan output maksimum dari input yang diberikan), efisiensi alokatif (kemampuan untuk menggunakan input dalam proporsi optimal mengingat harga mereka), dan efisiensi ekonomi (kombinasi efisiensi teknis dan alokatif). Efisiensi sempurna terjadi ketika petani beroperasi pada frontier produksi dengan kombinasi input optimal, sementara inefisiensi mewakili jarak dari frontier ini (Farrell, 1957).

Efisiensi teknis mengukur seberapa baik petani mengubah input menjadi output dibandingkan dengan frontier praktik terbaik. Petani yang efisien secara teknis tidak dapat meningkatkan output tanpa meningkatkan input atau tidak dapat mengurangi input tanpa mengurangi output. Inefisiensi teknis dapat disebabkan oleh praktik manajemen, tingkat keterampilan, ketersediaan informasi, atau kendala institusional. Efisiensi teknis murni terjadi ketika petani beroperasi pada frontier skala hasil variabel, sementara efisiensi skala mengukur seberapa dekat petani beroperasi dengan skala produksi optimal. Memahami sumber inefisiensi teknis membantu mengidentifikasi area spesifik dimana petani dapat meningkatkan kinerja melalui praktik yang lebih baik, pelatihan, atau adopsi teknologi (Battese & Coelli, 1995).

Efisiensi alokatif mengharuskan petani untuk memilih kombinasi input yang meminimalkan biaya mengingat harga input atau memaksimalkan pendapatan mengingat harga output. Ini memerlukan pemahaman tentang kemungkinan substitusi input, harga relatif, dan hubungan produksi. Petani yang efisien secara alokatif menyamakan rasio produk marginal dengan rasio harga input untuk semua pasangan input. Inefisiensi alokatif dapat disebabkan oleh masalah informasi,

ketidaksempurnaan pasar, pertimbangan risiko, atau tujuan non-ekonomi. Efisiensi ekonomi menggabungkan efisiensi teknis dan alokatif untuk mengukur kinerja keseluruhan dalam mengubah input menjadi output yang berharga (Ali & Flinn, 1989).

Pengukuran efisiensi telah berkembang dari analisis rasio sederhana menuju pendekatan ekonometrik dan pemrograman matematika yang canggih. Analisis Amplop Data (DEA) menggunakan pemrograman linier untuk membangun frontier non-parametrik dari kombinasi input-output yang diamati. DEA memungkinkan input dan output ganda tanpa memerlukan spesifikasi bentuk fungsional, membuatnya fleksibel untuk aplikasi pertanian. Namun, DEA sensitif terhadap outlier dan kesalahan pengukuran, dan tidak memperhitungkan gangguan statistik. Analisis Frontier Stokastik (SFA) menggunakan metode ekonometrik untuk memperkirakan frontier produksi parametrik yang menguraikan deviasi dari frontier menjadi inefisiensi dan gangguan acak. SFA memberikan kemampuan inferensi statistik tetapi memerlukan spesifikasi bentuk fungsional dan asumsi distribusi (Charnes et al., 1978; Aigner et al., 1977).

Perkembangan terbaru termasuk fungsi jarak terarah yang dapat menangani output yang tidak diinginkan seperti polusi lingkungan, DEA jaringan untuk menganalisis proses produksi multi-tahap, dan model efisiensi dinamis untuk menangkap hubungan intertemporal. Pendekatan metafrontier memungkinkan perbandingan efisiensi di berbagai teknologi atau lingkungan. Metode bootstrap menyediakan inferensi statistik untuk model DEA. Pilihan antara metode bergantung pada ketersediaan data, tujuan penelitian, dan asumsi yang bersedia dibuat oleh investigator (Chambers et al., 1996; O'Donnell et al., 2008).

Studi empiris telah mengidentifikasi berbagai faktor yang mempengaruhi tingkat efisiensi usahatani. Karakteristik petani seperti usia, pendidikan, pengalaman, dan keterampilan manajemen secara konsisten mempengaruhi efisiensi. Pendidikan meningkatkan kemampuan untuk memperoleh, memproses, dan memanfaatkan informasi secara efektif. Pengalaman memberikan pengetahuan praktis tentang kondisi lokal dan hubungan produksi. Namun, efek pengalaman mungkin non-linier, dengan hasil yang semakin berkurang atau bahkan efek negatif

jika pengalaman menyebabkan resistensi terhadap perubahan. Keterampilan manajemen melibatkan perencanaan, pengorganisasian, pemantauan, dan kemampuan pengambilan keputusan yang mempengaruhi semua aspek operasi usahatani (Abdulai & Huffman, 2000).

Karakteristik usahatani termasuk ukuran, endowmen sumber daya, dan lokasi secara signifikan mempengaruhi tingkat efisiensi. Ukuran usahatani optimal bergantung pada teknologi, kondisi pasar, dan lingkungan institusional. Usahatani besar mungkin mendapat manfaat dari skala ekonomi dalam pengadaan input, adopsi teknologi, atau pemasaran output, tetapi mungkin menderita dari dis-ekonomi manajemen. Kualitas lahan, kondisi iklim, dan akses infrastruktur menciptakan heterogenitas dalam lingkungan produksi. Pilihan tanaman dan sistem pertanian mempengaruhi efisiensi melalui persyaratan sumber daya yang berbeda, tingkat risiko, dan kompleksitas manajemen. Diversifikasi dapat meningkatkan efisiensi melalui pengurangan risiko dan komplementaritas, tetapi juga dapat menciptakan tantangan manajemen (Helfand & Levine, 2004).

Akses ke pasar, kredit, layanan penyuluhan, dan teknologi mempengaruhi efisiensi melalui ketersediaan informasi, kualitas input, dan adopsi inovasi. Akses pasar mempengaruhi harga output dan persyaratan kualitas, mempengaruhi insentif untuk perbaikan efisiensi. Akses kredit memungkinkan petani untuk membeli kuantitas dan kualitas input yang optimal. Layanan penyuluhan menyediakan informasi teknis dan saran manajemen. Ketersediaan teknologi menentukan kemungkinan produksi dan potensi efisiensi. Namun, faktor-faktor ini sering berinteraksi dengan cara yang kompleks, memerlukan analisis yang cermat untuk mengidentifikasi efek individualnya (Bravo-Ureta et al., 2007).

Adopsi PHT dapat meningkatkan efisiensi usahatani melalui berbagai jalur. Perbaikan efisiensi teknis dihasilkan dari pengendalian hama yang lebih baik, pengurangan kehilangan tanaman, dan penggunaan input yang dioptimalkan. Praktik PHT seperti pemantauan, aplikasi berbasis ambang, dan pendekatan terpadu dapat mengurangi pemborosan input dan meningkatkan waktu operasi. Agens pengendalian biologis dapat memberikan penekanan hama yang lebih konsisten dibandingkan pestisida kimia, mengurangi variabilitas hasil. Praktik budidaya

seperti rotasi tanaman atau varietas tahan dapat mengurangi ketergantungan pada input eksternal sambil mempertahankan atau meningkatkan hasil (Mariano et al., 2012).

Perbaikan efisiensi alokatif terjadi ketika PHT memungkinkan petani untuk mengoptimalkan kombinasi input mengingat harga relatif. Penggunaan pestisida yang berkurang dapat menurunkan biaya produksi sementara aplikasi selektif menargetkan titik intervensi yang paling efektif biaya. Perbaikan kualitas dari residu pestisida yang berkurang dapat mengakses pasar premium dengan harga yang lebih tinggi. Pengurangan risiko dari pengendalian hama yang lebih stabil dapat memungkinkan petani untuk membuat keputusan alokasi input yang lebih optimal. Namun, adopsi PHT mungkin memerlukan periode pembelajaran selama mana efisiensi mungkin menurun sementara sebelum perbaikan terjadi (Karagiannis & Furtan, 2002).

Efek efisiensi skala bergantung pada apakah PHT memungkinkan petani untuk beroperasi lebih dekat dengan skala optimal. Beberapa praktik PHT mungkin netral skala, sementara yang lain mungkin menguntungkan ukuran usahatani tertentu. Sistem PHT yang kompleks mungkin memerlukan skala minimum untuk menjadi efektif biaya, sementara praktik sederhana mungkin dapat diakses oleh usahatani kecil. Efek pembelajaran dapat menciptakan ketergantungan jalur dimana adopter awal mempertahankan keuntungan atas adopter yang kemudian. Efek jaringan dapat menciptakan manfaat yang meningkat dengan tingkat adopsi lingkungan (Genius et al., 2006).

Ukuran efisiensi statis memberikan snapshot kinerja pada titik tertentu dalam waktu, tetapi mungkin melewatkan aspek dinamis penting dari produksi pertanian. Efisiensi dinamis melibatkan alokasi sumber daya intertemporal, efek pembelajaran, dan adaptasi terhadap kondisi yang berubah. Investasi dalam PHT dapat mengurangi efisiensi jangka pendek tetapi meningkatkan kinerja jangka panjang melalui perbaikan kesehatan tanah, manajemen resistensi hama, atau positioning pasar. Kurva pembelajaran berarti bahwa efisiensi dapat meningkat seiring waktu ketika petani memperoleh pengalaman dengan teknologi baru (Oude Lansink & Silva, 2004).

Biaya penyesuaian untuk mengadopsi teknologi baru dapat sementara mengurangi efisiensi ketika petani mempelajari praktik baru dan memodifikasi sistem produksi. Ketergantungan jalur berarti bahwa keputusan masa lalu mempengaruhi tingkat efisiensi saat ini, menciptakan persistensi dalam perbedaan efisiensi. Aktivitas inovasi dapat mengurangi efisiensi jangka pendek tetapi meningkatkan posisi kompetitif jangka panjang. Investasi lingkungan mungkin tampak tidak efisien dalam istilah ekonomi yang sempit tetapi memberikan manfaat keberlanjutan jangka panjang (Silva & Stefanou, 2003).

Analisis efisiensi memberikan wawasan berharga untuk desain kebijakan dan penargetan. Mengidentifikasi sumber inefisiensi membantu memprioritaskan area intervensi. Petani yang beroperasi di bawah frontier mungkin mendapat manfaat lebih dari pelatihan manajemen atau layanan penyuluhan, sementara mereka yang dekat dengan frontier mungkin memerlukan teknologi baru atau perubahan institusional. Heterogenitas dalam tingkat efisiensi menunjukkan bahwa kebijakan satu-ukuran-untuk-semua mungkin tidak optimal. Strategi penargetan dapat memfokuskan sumber daya pada petani dengan potensi perbaikan terbesar atau efek spillover tertinggi (Bravo-Ureta et al., 2007).

Pemahaman faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi membantu merancang kebijakan yang mengatasi kendala yang mengikat. Jika inefisiensi teknis mendominasi, kebijakan harus fokus pada transfer pengetahuan, pelatihan, atau diseminasi teknologi. Jika inefisiensi alokatif lebih signifikan, kebijakan harus fokus pada peningkatan informasi pasar, sinyal harga, atau fungsi pasar input. Inefisiensi skala menunjukkan kebutuhan untuk reformasi pasar tanah, pengembangan koperasi, atau adaptasi teknologi untuk ukuran usahatani yang berbeda. Pertimbangan efisiensi dinamis menyoroti pentingnya kebijakan yang mendukung inovasi, pembelajaran, dan kapasitas adaptasi (Bravo-Ureta et al., 2007).

Analisis efisiensi dapat mengevaluasi efektivitas kebijakan dengan mengukur perubahan efisiensi sebelum-dan-sesudah atau membandingkan peserta dengan non-peserta. Analisis efektivitas biaya menggabungkan ukuran efisiensi dengan biaya program untuk menilai nilai untuk uang. Analisis distribusi

memeriksa apakah perbaikan efisiensi menguntungkan semua petani secara merata atau menciptakan pemenang dan pecundang. Analisis keberlanjutan mempertimbangkan apakah keuntungan efisiensi dipertahankan seiring waktu atau memerlukan dukungan berkelanjutan (Battese & Broca, 1997).

Pengukuran efisiensi menghadapi beberapa tantangan metodologis dan konseptual. Persyaratan data substansial, memerlukan informasi detail tentang semua input dan output dengan pengukuran yang akurat. Bias variabel yang hilang terjadi ketika input atau faktor lingkungan penting dihilangkan dari analisis. Masalah agregasi muncul ketika menggabungkan input atau output heterogen menjadi ukuran tunggal. Masalah kausalitas membuatnya sulit untuk membedakan apakah hubungan yang diamati mencerminkan efek efisiensi atau efek seleksi (Greene, 2008).

Faktor lingkungan menciptakan heterogenitas yang mungkin salah ditafsirkan sebagai inefisiensi jika tidak dikontrol dengan benar. Cuaca, kualitas tanah, tekanan hama, dan kondisi pasar bervariasi di seluruh usahatani dan waktu, mempengaruhi hubungan produksi. Analisis frontier stokastik mencoba untuk mengontrol faktor acak, tetapi mungkin tidak menangkap semua sumber heterogenitas. Pendekatan metafrontier dapat memperhitungkan lingkungan produksi yang berbeda, tetapi memerlukan observasi yang cukup dalam setiap lingkungan (Battese et al., 2004).

Dimensi kualitas sering sulit untuk dimasukkan dalam analisis efisiensi meskipun pentingnya untuk nilai pasar dan keberlanjutan. Kualitas output dapat meningkat bahkan jika kuantitas tetap konstan, mewakili keuntungan efisiensi yang tidak tertangkap dalam ukuran standar. Eksternalitas lingkungan, baik positif maupun negatif, jarang dimasukkan dalam perhitungan efisiensi meskipun kepentingan sosialnya. Efek kesejahteraan mungkin berbeda dari ukuran efisiensi jika harga pasar tidak mencerminkan nilai sosial (Reinhard et al., 2000).

Analisis efisiensi terus berkembang dengan perkembangan metodologis dan aplikasi baru. Pendekatan pembelajaran mesin sedang dieksplorasi untuk estimasi frontier yang lebih fleksibel dan identifikasi faktor. Aplikasi data besar menggunakan citra satelit, data sensor, dan catatan transaksi untuk meningkatkan

akurasi dan ketepatan waktu pengukuran. Sistem pemantauan efisiensi real-time dapat memberikan umpan balik untuk manajemen adaptif. Integrasi dengan teknologi pertanian presisi memungkinkan analisis efisiensi yang eksplisit secara spasial dalam usahatani (Koundouri et al., 2009).

Ukuran efisiensi keberlanjutan berusaha untuk memasukkan dimensi lingkungan dan sosial bersama kinerja ekonomi. Analisis efisiensi multi-kriteria mempertimbangkan berbagai tujuan secara bersamaan daripada mengasumsikan tujuan maksimisasi keuntungan tunggal. Model efisiensi perilaku menggabungkan faktor psikologis dan rasionalitas terbatas. Pendekatan efisiensi jaringan mempertimbangkan efek spillover dan saling ketergantungan antara usahatani. Perkembangan ini menjanjikan untuk memberikan ukuran efisiensi yang lebih komprehensif dan relevan kebijakan untuk pembangunan pertanian berkelanjutan (Picazo-Tadeo et al., 2011).

2.2.5. Kualitas Produk Sayuran

Kualitas produk sayuran merupakan konsep multidimensional yang mencakup berbagai atribut fisik, kimia, biologi, dan sensori yang menentukan penerimaan, kemampuan pemasaran, nilai nutrisi, dan keamanan produk untuk konsumsi manusia. Dalam era modern dengan meningkatnya kesadaran konsumen tentang keamanan pangan, keberlanjutan lingkungan, dan manfaat kesehatan, pemahaman tentang dimensi kualitas dan faktor-faktor yang mempengaruhinya menjadi krusial untuk kesuksesan dalam produksi dan pemasaran sayuran. Adopsi PHT memiliki potensi untuk secara signifikan meningkatkan berbagai aspek kualitas sayuran melalui pengurangan input kimia, perbaikan kesehatan tanaman, peningkatan kandungan nutrisi, dan karakteristik pascapanen yang lebih baik. Penilaian kualitas komprehensif memerlukan integrasi pengukuran objektif dengan preferensi konsumen subjektif dan persyaratan pasar (Kader, 2002; Barrett et al., 2010).

Karakteristik kualitas fisik merupakan kesan pertama yang diperoleh konsumen tentang produk sayuran dan secara signifikan mempengaruhi keputusan pembelian. Parameter ukuran termasuk panjang, lebar, diameter, berat, dan volume

harus sesuai dengan standar pasar atau preferensi konsumen. Keceragaman dalam distribusi ukuran penting untuk aplikasi pengolahan dan presentasi ritel. Karakteristik bentuk mempengaruhi baik daya tarik estetis maupun sifat fungsional untuk berbagai penggunaan akhir. Kelainan bentuk atau ketidakraturan dapat mengurangi penerimaan pasar bahkan jika nilai nutrisi tidak terpengaruh. Atribut warna termasuk rona, saturasi, dan kecerahan adalah indikator kualitas kritis yang mencerminkan kematangan, kesegaran, dan kadang-kadang kandungan nutrisi. Keceragaman warna dan tidak adanya perubahan warna adalah persyaratan pasar yang penting (Shewfelt, 1999).

Sifat tekstur seperti kekerasan, kerenyahan, kejusan, dan keberatan secara signifikan mempengaruhi kepuasan konsumen dan umur simpan. Kekerasan sangat penting untuk sayuran daun dan buah-buahan yang harus mempertahankan struktur selama transportasi dan penyimpanan. Integritas dinding sel, tekanan turgor, dan komponen struktural menentukan karakteristik tekstur. Kualitas permukaan termasuk kehalusan, tidak adanya noda, goresan, atau kerusakan mekanis yang dapat berfungsi sebagai titik masuk patogen. Kebersihan mencerminkan kebebasan dari tanah, puing-puing, residu pestisida, atau bahan asing. Faktor penampilan seperti kilau, transparansi, dan daya tarik visual menggabungkan berbagai atribut fisik menjadi penilaian estetika keseluruhan (Harker et al., 2003).

Praktik PHT dapat meningkatkan kualitas fisik melalui berbagai mekanisme. Pengurangan kerusakan hama menghasilkan lebih sedikit jaringan parut, deformasi, atau kerusakan mekanis yang mempengaruhi penampilan. Kesehatan tanaman yang lebih baik dari manajemen hama yang seimbang menyebabkan pertumbuhan dan perkembangan yang lebih seragam. Pengurangan stres dari aplikasi pestisida berlebihan dapat meningkatkan integritas dinding sel dan tekstur. Praktik budidaya seperti nutrisi dan manajemen air yang tepat dalam sistem PHT berkontribusi pada perkembangan tanaman yang optimal. Namun, beberapa praktik PHT seperti menerima kerusakan kosmetik kecil sebagai imbalan untuk penggunaan pestisida yang berkurang mungkin sementara mempengaruhi standar penampilan sampai preferensi konsumen beradaptasi (Benbrook et al., 2008).

Kualitas kimia mencakup komposisi nutrisi, parameter keamanan, dan senyawa bioaktif yang menentukan manfaat kesehatan dan potensi risiko. Kandungan makronutrient termasuk karbohidrat, protein, dan lemak menyediakan nilai nutrisi dasar, sementara mikronutrient seperti vitamin, mineral, dan elemen jejak sering menjadi alasan utama untuk mengonsumsi sayuran. Kandungan vitamin C sangat penting untuk banyak sayuran dan dapat secara signifikan dipengaruhi oleh praktik produksi, kondisi penyimpanan, dan metode pengolahan. Folat, beta-karoten, dan vitamin lain sensitif panas dan sensitif penyimpanan, memerlukan penanganan yang hati-hati untuk mempertahankan nilai nutrisi (Mozafar, 1993).

Kandungan mineral termasuk kalsium, besi, magnesium, kalium, dan seng menyediakan nutrisi esensial yang sering kekurangan dalam diet manusia. Kesehatan tanah, praktik pemupukan, dan pemilihan varietas secara signifikan mempengaruhi penyerapan dan akumulasi mineral. Namun, kandungan mineral juga dapat mencakup logam berat berbahaya seperti kadmium, timbal, atau merkuri dari tanah atau sumber air yang terkontaminasi. Pemantauan dan manajemen kontaminasi tanah sangat penting untuk keamanan pangan. Akumulasi nitrat dalam sayuran daun dapat menjadi kekhawatiran kesehatan, khususnya untuk bayi, dan dipengaruhi oleh tingkat pemupukan nitrogen, waktu, dan bentuk (Santamaria, 2006).

Residu pestisida mewakili kekhawatiran keamanan kimia utama yang secara langsung mengatasi manfaat PHT. Batas Maksimum Residu (BMR) yang ditetapkan oleh badan regulasi mendefinisikan tingkat yang dapat diterima untuk kombinasi pestisida-tanaman yang berbeda. Praktik PHT biasanya menghasilkan tingkat residu yang secara signifikan lebih rendah melalui penggunaan pestisida yang berkurang, waktu aplikasi yang lebih baik, dan penggunaan bahan selektif dengan persistensi yang lebih pendek. Namun, bahkan sistem PHT mungkin menggunakan beberapa input kimia, memerlukan perhatian yang cermat terhadap interval pra-panen dan tingkat aplikasi. Metode analitis untuk deteksi residu terus meningkat, dengan batas deteksi yang lebih rendah dan panel analit yang diperluas (Oerke, 2006).

Senyawa bioaktif termasuk polifenol, flavonoid, karotenoid, dan fitokimia lainnya menyediakan aktivitas antioksidan dan potensi manfaat kesehatan di luar nutrisi dasar. Senyawa-senyawa ini sering berkontribusi pada warna, rasa, dan resistensi penyakit alami dalam tanaman. Praktik produksi yang mempromosikan respons stres tanaman, seperti stres air terkontrol atau tekanan hama sedang, mungkin benar-benar meningkatkan kandungan senyawa bioaktif. Sistem organik dan input rendah sering menunjukkan tingkat senyawa bioaktif tertentu yang lebih tinggi, meskipun hasil bervariasi dengan tanaman, senyawa, dan kondisi lingkungan (Brandt et al., 2011).

Kualitas mikrobiologi fokus pada keberadaan atau ketiadaan bakteri patogenik, jamur, virus, dan parasit yang dapat menyebabkan penyakit bawaan makanan. Kontaminasi dapat terjadi selama produksi melalui air yang terkontaminasi, amandemen organik, kontak hewan, atau kebersihan pekerja yang buruk. Kontaminasi pascapanen dapat terjadi selama pengolahan, pengemasan, transportasi, atau penyimpanan jika prosedur sanitasi yang tepat tidak diikuti. Patogen penting termasuk Salmonella, E. coli O157:H7, Listeria monocytogenes, dan berbagai parasit yang dapat bertahan hidup pada permukaan produk segar (Beuchat, 2002).

Praktik PHT dapat meningkatkan atau mengorbankan keamanan mikrobiologi tergantung pada detail implementasi. Penggunaan pestisida yang berkurang dapat memungkinkan populasi mikroorganisme yang menguntungkan lebih tinggi yang dapat menekan patogen melalui eksklusi kompetitif. Namun, peningkatan penggunaan amandemen organik atau agens pengendalian biologis memerlukan perhatian yang cermat terhadap potensi introduksi patogen. Praktik manajemen air harus menyeimbangkan kebutuhan pengendalian hama dengan pencegahan kontaminasi. Integrasi Praktik Pertanian yang Baik (GAP) dengan sistem PHT memastikan bahwa pertimbangan keamanan pangan ditangani bersama tujuan pengelolaan hama (Stopforth et al., 2005).

Metode deteksi untuk patogen termasuk teknik berbasis kultur tradisional, uji imunologi cepat, dan metode molekuler seperti PCR. Strategi sampling harus memperhitungkan distribusi mikroorganisme yang heterogen dan variasi musiman

dalam tingkat kontaminasi. Sistem Analisis Bahaya Titik Kontrol Kritis (HACCP) membantu mengidentifikasi titik risiko dalam sistem produksi dan pascapanen dimana kontaminasi paling mungkin terjadi. Sistem ketertelusuran memungkinkan respons cepat terhadap insiden kontaminasi dan membantu mengidentifikasi sumber masalah (Scharff, 2012).

Kualitas sensori mencerminkan persepsi konsumen tentang rasa, aroma, tekstur, dan penerimaan keseluruhan yang pada akhirnya menentukan kesuksesan pasar. Senyawa rasa termasuk gula, asam organik, senyawa volatil, dan metabolit sekunder yang menciptakan rasa dan aroma karakteristik. Kandungan gula mempengaruhi persepsi rasa manis dan dipengaruhi oleh varietas, kematangan, kondisi pertumbuhan, dan penanganan pascapanen. Kandungan asam mempengaruhi rasa asam dan keasaman sambil juga mempengaruhi kualitas simpan melalui efek pH. Senyawa volatil yang bertanggung jawab untuk aroma sering sensitif suhu dan dapat hilang selama penyimpanan yang tidak tepat (Kader, 2008).

Kepahitan atau rasa tidak enak dapat disebabkan oleh kondisi stres, pemupukan yang tidak tepat, atau residu pestisida yang mempengaruhi rasa bahkan pada tingkat di bawah ambang keamanan. Beberapa konsumen dapat mendeteksi rasa pestisida pada konsentrasi yang sangat rendah, mempengaruhi penerimaan sayuran yang diproduksi secara konvensional. Sayuran yang diproduksi PHT sering menunjukkan profil rasa yang lebih baik karena input kimia yang berkurang dan kesehatan tanaman yang lebih baik. Namun, ekspektasi dan preferensi konsumen sangat bervariasi, memerlukan riset pasar untuk memahami persyaratan pasar target (Young et al., 1996).

Persepsi tekstur melibatkan sifat mekanis seperti kekerasan, kerenyahan, kejusan, dan rasa di mulut yang dievaluasi selama konsumsi. Sayuran segar harus mempertahankan tekstur yang sesuai sepanjang umur simpan mereka, memerlukan optimisasi praktik produksi, waktu panen, dan penanganan pascapanen. Kondisi penyimpanan khususnya mempengaruhi tekstur melalui kehilangan kelembaban, kerusakan dinding sel, dan perubahan enzimatik. Pengemasan atmosfer yang

dimodifikasi dapat membantu mempertahankan kualitas tekstur selama transportasi dan tampilan ritel (Jackman & Stanley, 1995).

Penilaian kualitas objektif menggunakan metode instrumental untuk mengukur parameter kualitas spesifik dengan hasil yang dapat direproduksi dan kuantitatif. Metode spektrofotometri mengukur warna menggunakan ruang warna standar seperti CIE Lab*. Analisis tekstur mengukur kekerasan, gaya penetrasi, atau karakteristik kompresi. Kromatografi cair kinerja tinggi (HPLC) dan kromatografi gas (GC) menganalisis komponen nutrisi, residu pestisida, dan senyawa rasa. Spektroskopi inframerah dekat menyediakan analisis cepat dan non-destruktif dari berbagai parameter kualitas secara bersamaan (Abbott, 1999).

Penilaian kualitas subjektif bergantung pada evaluasi sensori manusia menggunakan panel terlatih atau pengujian konsumen. Analisis deskriptif menggunakan panelis terlatih untuk mengidentifikasi dan mengkuantifikasi atribut sensori spesifik. Pengujian preferensi konsumen mengukur penerimaan di antara segmen pasar target. Indeks kualitas menggabungkan berbagai pengukuran objektif menjadi skor tunggal untuk perbandingan yang lebih mudah. Namun, korelasi antara pengukuran objektif dan preferensi konsumen tidak selalu kuat, memerlukan integrasi kedua pendekatan untuk penilaian kualitas yang komprehensif (Lawless & Heymann, 2010).

Perbaikan kualitas dari adopsi PHT dapat menciptakan peluang pasar yang signifikan melalui penetapan harga premium, akses pasar yang diperluas, dan diferensiasi merek. Pasar premium untuk sayuran organik, yang ditanam secara lokal, atau yang diproduksi secara berkelanjutan tumbuh dengan cepat di banyak wilayah. Sistem sertifikasi seperti organik, pengelolaan hama terpadu, atau praktik pertanian yang baik dapat memperoleh premi harga 10-30% atau lebih. Pasar ekspor sering memiliki persyaratan kualitas yang ketat termasuk batas residu pestisida, dokumentasi ketertelusuran, dan sertifikasi kualitas (Dimitri & Greene, 2002).

Konsistensi kualitas sering lebih penting daripada tingkat kualitas absolut untuk pembeli komersial yang perlu mempertahankan penawaran produk yang konsisten. Sistem PHT yang mengurangi variabilitas hasil dan fluktuasi kualitas mungkin disukai bahkan jika kualitas rata-rata hanya sedikit diperbaiki. Perbaikan

umur simpan dapat mengurangi kerugian dalam rantai distribusi dan memperluas jangkauan pasar. Pengembangan merek berdasarkan atribut kualitas memerlukan komunikasi yang konsisten tentang praktik produksi dan manfaat kualitas kepada konsumen (Darby & Karni, 1973).

Regulasi pemerintah menetapkan standar kualitas minimum untuk parameter keamanan sementara standar industri sering menangani atribut kualitas komersial. Codex Alimentarius menyediakan standar internasional untuk residu pestisida, kontaminan, dan persyaratan pelabelan. Badan nasional seperti FDA, USDA, atau badan setara di negara lain menetapkan regulasi khusus untuk pasar mereka. Kepatuhan memerlukan pemahaman tentang standar yang berlaku, prosedur pemantauan, dan persyaratan dokumentasi (Codex Alimentarius, 2019).

Standar privat dari pengecer, pengolah, atau badan sertifikasi sering melebihi persyaratan pemerintah dan dapat menentukan praktik produksi tertentu, atribut kualitas, atau sistem dokumentasi. Standar GlobalGAP, SQF, dan BRC banyak digunakan dalam perdagangan internasional. Sertifikasi organik memerlukan kepatuhan pada praktik produksi spesifik termasuk penggunaan pestisida terbatas. Program sertifikasi pengelolaan hama terpadu sedang dikembangkan untuk mengakui adopsi PHT. Pemahaman dan kepatuhan pada standar yang relevan sangat penting untuk akses pasar (Henson & Reardon, 2005).

Penilaian kualitas berkembang menuju pengukuran yang lebih komprehensif, cepat, dan relevan konsumen. Instrumen portabel memungkinkan pengujian lapangan parameter kualitas, memungkinkan pengambilan keputusan real-time. Teknologi blockchain menyediakan ketertelusuran sepanjang rantai pasokan, meningkatkan kepercayaan konsumen dalam klaim kualitas. Pendekatan metabolomik menganalisis profil kimia lengkap untuk karakterisasi kualitas yang lebih komprehensif. Preferensi konsumen terus berkembang menuju keberlanjutan lingkungan, produksi lokal, dan praktik produksi transparan, menciptakan dimensi kualitas baru untuk keunggulan kompetitif (Reid et al., 2006).

2.2.6. Ekonomi Agribisnis dan Analisis Finansial

Ekonomi agribisnis dalam konteks adopsi PHT melibatkan analisis komprehensif terhadap implikasi finansial, dinamika pasar, pertimbangan rantai nilai, dan insentif ekonomi yang mempengaruhi proses pengambilan keputusan petani dan pemangku kepentingan lainnya dalam sistem pertanian. Pemahaman prinsip ekonomi fundamental untuk merancang program PHT yang dapat berkelanjutan yang dapat mempertahankan diri melalui mekanisme pasar daripada hanya bergantung pada subsidi atau mandat regulasi. Analisis ekonomi harus mempertimbangkan tidak hanya biaya dan manfaat langsung untuk petani individu, tetapi juga efek tidak langsung, eksternalitas, dampak distribusi, dan perubahan sistemik yang mungkin terjadi dari adopsi PHT skala luas. Integrasi analisis finansial dengan pertimbangan ekonomi yang lebih luas menyediakan kerangka untuk desain kebijakan dan implementasi program yang ekonomis dan layak secara politik (Norton et al., 2005; Zilberman et al., 1991).

Analisis biaya-manfaat komprehensif untuk adopsi PHT memerlukan identifikasi dan kuantifikasi yang cermat dari semua biaya dan manfaat yang relevan selama cakrawala waktu yang sesuai. Biaya langsung termasuk pengeluaran untuk agens pengendalian biologis, peralatan pemantauan, program pelatihan, biaya sertifikasi, dan persyaratan tenaga kerja tambahan. Biaya tidak langsung mungkin termasuk biaya peluang waktu yang dihabiskan untuk mempelajari praktik baru, pengurangan hasil sementara selama periode transisi, atau manfaat yang hilang dari praktik yang sudah dikenal. Beberapa biaya adalah investasi satu kali sementara yang lain adalah pengeluaran berulang yang harus diperhitungkan dalam operasi berkelanjutan. Waktu biaya penting karena investasi awal mungkin diperlukan sebelum manfaat direalisasikan (Zadoks, 1989).

Manfaat langsung termasuk penghematan biaya dari pembelian pestisida yang berkurang, perbaikan hasil dari pengendalian hama yang lebih baik, premi kualitas untuk produk dengan residu yang berkurang, dan keuntungan efisiensi dari penggunaan input yang lebih presisi. Manfaat tidak langsung mungkin termasuk peningkatan kesehatan pekerja, pengurangan kewajiban lingkungan, peningkatan reputasi usahatani, atau akses ke pasar baru. Manfaat pengurangan risiko dihasilkan

dari pengendalian hama yang lebih stabil, strategi manajemen yang terdiversifikasi, dan pengurangan ketergantungan pada metode pengendalian tunggal. Beberapa manfaat seperti perbaikan kesehatan tanah atau peningkatan keanekaragaman hayati mungkin membutuhkan waktu bertahun-tahun untuk sepenuhnya terwujud. Analisis ekonomi yang tepat harus memperhitungkan waktu manfaat dan menggunakan tingkat diskonto yang sesuai untuk membandingkan nilai sekarang (Lichtenberg & Zilberman, 1986).

Return on investment (ROI) mengukur profitabilitas adopsi PHT dengan membandingkan manfaat bersih dengan biaya investasi awal. Periode pengembalian menunjukkan berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk pengembalian investasi menyamai biaya awal. Nilai bersih sekarang (NPV) memperhitungkan nilai waktu uang dalam mengevaluasi profitabilitas jangka panjang. Tingkat pengembalian internal (IRR) memberikan ukuran daya tarik investasi dibandingkan dengan penggunaan modal alternatif. Rasio manfaat-biaya membandingkan nilai sekarang manfaat dengan nilai sekarang biaya. Metrik ini membantu petani mengevaluasi adopsi PHT sebagai keputusan investasi dan membandingkan dengan peluang perbaikan usahatani lainnya (Gittinger, 1982).

Pengembalian yang disesuaikan risiko memperhitungkan ketidakpastian dalam biaya, hasil, harga, dan faktor lain yang mempengaruhi profitabilitas. Varians dalam pengembalian mungkin sama pentingnya dengan rata-rata pengembalian untuk petani yang menghindari risiko. Analisis sensitivitas menguji bagaimana perubahan dalam asumsi kunci mempengaruhi perhitungan profitabilitas. Analisis skenario mempertimbangkan hasil yang mungkin berbeda dan probabilitasnya. Simulasi Monte Carlo dapat menggabungkan berbagai sumber ketidakpastian secara bersamaan. Memahami karakteristik risiko membantu petani membuat keputusan yang tepat dan mungkin mengidentifikasi kebutuhan untuk strategi manajemen risiko seperti asuransi atau diversifikasi (Anderson et al., 1977).

Permintaan pasar untuk sayuran yang diproduksi PHT bergantung pada preferensi konsumen, sensitivitas harga, kemungkinan substitusi, dan ketersediaan alternatif. Pasar premium ada untuk sayuran organik bersertifikat, bersertifikat PHT, atau yang diproduksi secara lokal, tetapi ukuran pasar dan premi harga

bervariasi berdasarkan lokasi, musim, dan kondisi ekonomi. Pengembangan pasar mungkin memerlukan edukasi konsumen, kampanye pemasaran, dan koordinasi rantai pasokan. Pemahaman elastisitas permintaan membantu memprediksi bagaimana perubahan harga mempengaruhi penetrasi pasar (Thompson & Wilson, 1994).

Analisis rantai pasokan menguji bagaimana adopsi PHT mempengaruhi hubungan dengan pemasok input, pengolah, pengecer, dan konsumen. Rantai pasokan yang berbeda mungkin memiliki persyaratan kualitas, struktur harga, atau layanan dukungan yang berbeda. Rantai pasokan yang lebih pendek seperti pasar petani atau pertanian yang didukung masyarakat mungkin lebih menerima produk PHT tetapi mungkin memiliki skala terbatas. Rantai pasokan yang lebih panjang mungkin memerlukan standardisasi, sertifikasi, atau jaminan volume. Biaya transaksi termasuk biaya pencarian, biaya negosiasi, dan biaya pemantauan dapat secara signifikan mempengaruhi profitabilitas saluran pasar yang berbeda (Williamson, 1985).

Peluang pengolahan nilai tambah dapat meningkatkan pengembalian dari sayuran yang diproduksi PHT melalui diferensiasi produk, perpanjangan umur simpan, atau fitur kenyamanan. Pengolahan mungkin memerlukan investasi tambahan dalam peralatan, fasilitas, atau tenaga kerja tetapi dapat menangkap lebih banyak total pengembalian rantai nilai. Atribut kualitas dari produksi PHT seperti rasa yang lebih baik, nutrisi, atau keamanan mungkin dipertahankan atau ditingkatkan melalui pengolahan yang sesuai. Pemasaran produk nilai tambah memerlukan pemahaman preferensi konsumen dan positioning kompetitif (King et al., 2010).

Skala ekonomi dalam adopsi PHT terjadi ketika biaya per unit menurun dengan intensitas adopsi atau ukuran usahatani. Biaya tetap pembelajaran, peralatan, atau sertifikasi dapat disebarkan pada volume produksi yang lebih besar. Operasi yang lebih besar mungkin memiliki akses yang lebih baik untuk bantuan teknis, pengadaan input, atau saluran pemasaran. Namun, kompleksitas manajemen mungkin meningkat dengan skala, berpotensi mengimbangi beberapa keuntungan biaya. Pertimbangan skala efisien minimum membantu menentukan apakah PHT

dapat dilakukan untuk usahatani kecil atau memerlukan konsolidasi (Hallam, 1991).

Ekonomi ruang lingkup muncul ketika produksi bersama berbagai tanaman atau integrasi berbagai praktik PHT mengurangi total biaya dibandingkan implementasi terpisah. Agens pengendalian biologis dapat menekan hama pada berbagai tanaman secara bersamaan. Sistem pemantauan dan peralatan dapat melayani berbagai tujuan. Pengetahuan dan keterampilan yang dikembangkan untuk satu komponen PHT dapat ditransfer untuk yang lain. Praktik budidaya seperti manajemen habitat dapat memberikan manfaat di seluruh sistem pertanian. Memahami ekonomi ruang lingkup membantu merancang program PHT komprehensif yang memaksimalkan sinergi (Chavas & Kim, 2010).

Adopsi PHT dapat mengubah profil risiko operasi pertanian dengan cara yang kompleks. Penggunaan pestisida yang berkurang dapat meningkatkan risiko produksi jangka pendek jika metode pengendalian alternatif awalnya kurang dapat diandalkan. Namun, risiko jangka panjang dapat menurun melalui hubungan ekologis yang lebih stabil, pengembangan resistensi yang berkurang, dan strategi manajemen yang terdiversifikasi. Beberapa praktik PHT dapat mengurangi risiko bisnis melalui pengurangan biaya bahkan jika risiko produksi meningkat. Memahami implikasi risiko membantu petani membuat keputusan asuransi yang tepat dan mungkin menunjukkan kebutuhan untuk produk asuransi khusus (Knight & Coble, 1997).

Asuransi berindeks cuaca atau asuransi area-yield mungkin lebih sesuai untuk adopter PHT daripada asuransi hasil tradisional jika PHT mengubah distribusi hasil atau korelasi. Asuransi tanaman multi-bahaya mungkin memerlukan penyesuaian untuk memperhitungkan praktik manajemen hama yang berbeda. Asuransi mandiri melalui cadangan, diversifikasi, atau perencanaan kontinjensi mungkin lebih penting untuk adopter PHT yang kurang bergantung pada input eksternal. Pengumpulan risiko melalui koperasi atau pemasaran kelompok dapat membantu petani kecil mengelola risiko yang terkait dengan adopsi PHT (Miranda & Glauber, 1997).

Kegagalan pasar termasuk eksternalitas, karakteristik barang publik, asimetri informasi, dan persaingan tidak sempurna dapat mencegah tingkat adopsi PHT yang optimal tanpa intervensi kebijakan. Manfaat lingkungan dari penggunaan pestisida yang berkurang diperoleh masyarakat tetapi mungkin tidak tercermin dalam harga pasar, memerlukan skema pembayaran untuk jasa ekosistem atau regulasi lingkungan untuk menginternalisasi manfaat. Informasi tentang manfaat PHT mungkin tidak memadai atau didistribusikan secara asimetris, memerlukan investasi publik dalam penelitian, demonstrasi, atau penyuluhan. Efek jaringan dapat menciptakan masalah koordinasi yang memerlukan tindakan kolektif atau fasilitasi pemerintah (Zilberman et al., 1991).

Program subsidi dapat mengurangi biaya adopsi tetapi harus dirancang dengan hati-hati untuk menghindari distorsi sinyal pasar atau menciptakan ketergantungan. Insentif pajak mungkin lebih ramah pasar daripada subsidi langsung. Pendekatan regulasi seperti pembatasan pestisida atau persyaratan sertifikasi dapat menciptakan pasar untuk produk PHT tetapi dapat membebankan biaya kepatuhan. Dukungan penelitian dan pengembangan mengatasi karakteristik barang publik dari generasi pengetahuan. Program penyuluhan membantu mengatasi hambatan informasi tetapi memerlukan pendanaan publik (Alston et al., 1995).

Analisis ekuilibrium parsial menguji dampak adopsi PHT dalam pasar sayuran sambil menahan sektor lain tetap konstan. Efek harga bergantung pada tingkat adopsi, elastisitas penawaran dan permintaan, dan tingkat diferensiasi produk. Perubahan surplus konsumen dihasilkan dari efek harga dan kualitas. Perubahan surplus produsen mencerminkan penghematan biaya, efek hasil, dan harga premium. Segmentasi pasar dapat menciptakan dampak harga yang berbeda dalam pasar konvensional versus premium (Gardner, 1987).

Analisis ekuilibrium umum mempertimbangkan interaksi dengan sektor pertanian lain, pasar input, dan ekonomi yang lebih luas. Adopsi PHT skala besar dapat mempengaruhi permintaan pestisida, pasar tenaga kerja, pola penggunaan lahan, atau kualitas lingkungan dengan implikasi ekonomi luas. Analisis input-output melacak efek ekonomi tidak langsung melalui keterkaitan rantai pasokan.

Model ekuilibrium umum yang dapat dihitung dapat menguji interaksi kompleks tetapi memerlukan data substansial dan asumsi pemodelan (Hertel, 1997).

Dampak ekonomi regional termasuk efek lapangan kerja, perubahan distribusi pendapatan, dan implikasi pembangunan ekonomi lokal. Adopsi PHT dapat menguntungkan jenis usahatani atau wilayah tertentu dibandingkan yang lain. Manfaat pembangunan pedesaan dapat membenarkan dukungan publik bahkan jika efek ekonomi nasional kecil. Implikasi perdagangan internasional termasuk perubahan keunggulan komparatif, peluang ekspor, atau persaingan impor. Produsen negara berkembang mungkin mendapat manfaat dari biaya adopsi PHT yang lebih rendah sambil menghadapi hambatan dalam mengakses pasar premium (Anderson & Martin, 2005).

#Adopsi PHT mungkin memerlukan perubahan dalam praktik pinjaman untuk memperhitungkan struktur biaya yang berbeda, arus kas, atau profil risiko. Pemberi pinjaman pertanian tradisional mungkin kurang memahami ekonomi PHT, memerlukan edukasi atau program pinjaman khusus. Pemberi pinjaman pertanian organik atau berkelanjutan mungkin lebih familiar dengan kebutuhan pembiayaan PHT. Persyaratan modal kerja mungkin berubah jika pembelian input dialihkan ke waktu atau pemasok yang berbeda. Kredit investasi mungkin diperlukan untuk peralatan atau infrastruktur khusus (Barry et al., 2000).

Penilaian risiko kredit harus mempertimbangkan baik risiko produksi maupun pasar yang terkait dengan adopsi PHT. Persyaratan jaminan mungkin dipengaruhi oleh perubahan dalam nilai aset atau kemampuan pemasaran. Syarat pinjaman termasuk jadwal pembayaran dan tingkat bunga harus mencerminkan pola arus kas aktual dari operasi PHT. Bantuan teknis yang terintegrasi dengan program pinjaman dapat meningkatkan kinerja pinjaman dan keberhasilan adopsi. Pendekatan keuangan mikro mungkin sesuai untuk adopsi PHT skala kecil di negara berkembang (Binswanger & Khandker, 1995).

Investasi R&D dalam teknologi PHT memerlukan analisis ekonomi untuk memandu prioritas penelitian dan menilai pengembalian sosial. Adopsi teknologi mengikuti pola yang dapat diprediksi dengan adopter awal, adopter mayoritas, dan laggard memiliki karakteristik ekonomi yang berbeda. Kurva pembelajaran

mengurangi biaya adopsi seiring waktu sementara efek jaringan meningkatkan manfaat. Mekanisme transfer teknologi termasuk layanan penyuluhan, konsultasi swasta, atau organisasi industri mempengaruhi tingkat adopsi dan hasil ekonomi (Ruttan, 1996).

Pendekatan sistem inovasi mengakui saling ketergantungan antara institusi penelitian, layanan penyuluhan, pemasok input, petani, dan aktor pasar. Insentif ekonomi harus selaras di seluruh sistem untuk mendukung pengembangan dan adopsi PHT. Kemitraan publik-swasta dapat memanfaatkan sumber daya dan keahlian dari berbagai aktor. Pertimbangan kekayaan intelektual mempengaruhi insentif untuk investasi sektor swasta dalam teknologi PHT. Transfer teknologi internasional dapat mempercepat pengembangan PHT di negara berkembang (Spielman, 2005).

2.3. Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran penelitian ini dibangun berdasarkan sintesis komprehensif dari berbagai kerangka teoretis, bukti empiris, dan pemahaman kontekstual tentang adopsi teknologi pertanian dalam sistem sosial ekonomi yang kompleks. Kerangka ini mengintegrasikan wawasan dari teori difusi inovasi, ekonomi pertanian, ilmu perilaku, pemikiran sistem, dan ilmu keberlanjutan untuk mengembangkan pemahaman holistik tentang proses adopsi PHT dan dampaknya. Model konseptual mengakui bahwa keputusan adopsi dan hasil tertanam dalam sistem multi-level yang melibatkan petani individu, rumah tangga petani, komunitas, pasar, institusi, dan lingkungan kebijakan. Interaksi dinamis antara tingkatan ini menciptakan loop umpan balik, sifat yang muncul, dan konsekuensi yang tidak diinginkan yang harus dipertimbangkan dalam analisis komprehensif (Klerkx et al., 2012; Darnhofer et al., 2010).

Fondasi teoretis untuk kerangka pemikiran ini dibangun atas pengakuan bahwa adopsi teknologi pertanian adalah fenomena sosial kompleks yang tidak dapat dijelaskan secara memadai oleh model faktor tunggal atau pendekatan ekonomi murni. Teori difusi inovasi Rogers memberikan kerangka dasar untuk memahami bagaimana inovasi menyebar melalui sistem sosial, tetapi harus

ditingkatkan dengan perspektif tambahan untuk menangkap kompleksitas penuh pengambilan keputusan pertanian. Teori ekonomi adopsi berkontribusi pemahaman tentang proses pengambilan keputusan rasional, pertimbangan risiko, dan kendala sumber daya, tetapi harus dilengkapi dengan wawasan perilaku tentang rasionalitas terbatas, pengaruh sosial, dan motivasi non-ekonomi. Pendekatan pemikiran sistem mengakui sifat yang muncul dan loop umpan balik yang timbul dari interaksi antara berbagai aktor dan institusi (Rogers, 2003; Feder et al., 1985; Darnhofer et al., 2010).

Perspektif sistem inovasi pertanian menekankan bahwa adopsi teknologi yang berhasil memerlukan ekosistem aktor, institusi, dan aliran pengetahuan yang mendukung daripada hanya mentransfer informasi teknis dari peneliti ke petani. Inovasi dipandang sebagai proses pembelajaran interaktif yang melibatkan ko-kreasi pengetahuan, adaptasi teknologi untuk kondisi lokal, dan pengembangan institusi pendukung. Perspektif ini menyoroti pentingnya keterkaitan, jaringan, dan kolaborasi antara berbagai aktor dalam proses inovasi. Implikasi kebijakan fokus pada memfasilitasi pembelajaran, membangun kapasitas, dan menciptakan lingkungan yang memungkinkan daripada hanya menyediakan teknologi atau informasi (Klerkx et al., 2012; Spielman et al., 2009).

Kerangka pemikiran ini mengadopsi perspektif multi-level yang mengakui bahwa adopsi PHT terjadi dalam hierarki bersarang dari sistem yang berinteraksi. Level individu melibatkan karakteristik petani, pengetahuan, sikap, preferensi risiko, dan proses pengambilan keputusan yang secara langsung mempengaruhi pilihan adopsi. Level rumah tangga mempertimbangkan dinamika keluarga, keputusan alokasi sumber daya, ketersediaan tenaga kerja, dan tujuan ekonomi yang mempengaruhi adopsi teknologi. Level usahatani menguji kondisi biofisik, sistem produksi, endowmen sumber daya, dan kendala teknis yang menentukan kelayakan dan profitabilitas adopsi PHT. Level komunitas termasuk jaringan sosial, institusi lokal, kapasitas tindakan kolektif, dan norma bersama yang memfasilitasi atau menghambat adopsi inovasi (Geels & Schot, 2007).

Level pasar mencakup rantai nilai, hubungan harga, standar kualitas, dan dinamika kompetitif yang menciptakan insentif ekonomi untuk adopsi PHT. Level institusional termasuk aturan formal, norma informal, mekanisme penegakan, dan struktur organisasi yang membentuk perilaku dan peluang. Level kebijakan melibatkan intervensi pemerintah, kerangka regulasi, investasi publik, dan prioritas strategis yang mempengaruhi lingkungan inovasi. Setiap level memiliki dinamika dan kendalanya sendiri, tetapi hasil di setiap level dipengaruhi oleh kondisi dan perubahan di level lain melalui berbagai mekanisme interaksi (Ostrom, 2009).

Proses adopsi dalam kerangka ini dipahami sebagai proses multi-tahap dan iteratif daripada momen keputusan tunggal. Tahap kesadaran melibatkan petani menjadi sadar akan keberadaan PHT, prinsip dasar, dan relevansi potensial untuk situasi mereka. Sumber informasi, saluran komunikasi, dan jaringan sosial memainkan peran krusial dalam menciptakan kesadaran. Tahap minat melibatkan petani mencari informasi tambahan, mengevaluasi potensi aplikabilitas, dan membentuk sikap awal terhadap PHT. Kualitas dan aksesibilitas informasi, kredibilitas sumber, dan kompatibilitas dengan kepercayaan yang ada mempengaruhi perkembangan minat (Rogers, 2003).

Tahap evaluasi melibatkan penilaian sistematis biaya, manfaat, risiko, dan persyaratan implementasi PHT relatif terhadap praktik saat ini dan pilihan alternatif. Petani dapat melakukan perbandingan formal atau informal, mencari saran dari sumber terpercaya, atau mengamati pengalaman orang lain. Tahap uji coba memungkinkan petani untuk menguji praktik PHT pada skala terbatas untuk memperoleh pengalaman langsung dengan tantangan implementasi dan hasil. Kemampuan uji coba sangat penting untuk teknologi kompleks seperti PHT yang melibatkan berbagai komponen dan memerlukan pengembangan keterampilan. Tahap adopsi melibatkan komitmen untuk memasukkan praktik PHT ke dalam operasi usahatani reguler dengan niat penggunaan berkelanjutan (Pannell et al., 2006).

Tahap konfirmasi melibatkan evaluasi berkelanjutan kinerja PHT, adaptasi praktik untuk mengoptimalkan hasil, dan keputusan tentang kelanjutan, modifikasi, atau penghentian. Efek pembelajaran, keadaan yang berubah, dan ketersediaan

alternatif dapat mempengaruhi keputusan konfirmasi. Penemuan kembali atau modifikasi praktik umum terjadi ketika petani mengadaptasi rekomendasi generik untuk kondisi spesifik mereka. Penghentian dapat terjadi jika praktik terbukti tidak memuaskan, alternatif yang lebih baik tersedia, atau keadaan berubah. Memahami faktor-faktor yang mempengaruhi setiap tahap membantu mengidentifikasi titik intervensi untuk memfasilitasi adopsi (Rogers, 2003).

Kerangka untuk menganalisis determinan adopsi mengorganisir faktor-faktor ke dalam beberapa kategori berdasarkan perspektif teoretis dan bukti empiris. Karakteristik individu termasuk variabel modal manusia seperti pendidikan, pengalaman, dan pelatihan yang mempengaruhi kemampuan untuk memperoleh, memproses, dan memanfaatkan informasi tentang PHT. Kemampuan kognitif, gaya belajar, dan kapasitas pemrosesan informasi mempengaruhi bagaimana petani mengevaluasi dan mengimplementasikan teknologi baru. Faktor psikologis seperti preferensi risiko, preferensi waktu, sikap lingkungan, dan motivasi berprestasi mempengaruhi kemauan untuk mengadopsi inovasi. Faktor demografis seperti usia, gender, dan struktur keluarga dapat mempengaruhi adopsi melalui berbagai mekanisme (Knowler & Bradshaw, 2007).

Faktor ekonomi termasuk sumber daya keuangan, endowment aset, sumber pendapatan, dan akses pasar yang menentukan kelayakan dan daya tarik adopsi PHT. Ukuran usahatani, kepemilikan lahan, ketersediaan modal, dan pola arus kas mempengaruhi kemampuan untuk berinvestasi dalam praktik baru dan menyerap biaya transisi. Kondisi pasar termasuk harga, premi kualitas, dan persyaratan pembeli menciptakan insentif ekonomi untuk adopsi. Faktor risiko seperti variabilitas cuaca, tekanan hama, dan volatilitas pasar mempengaruhi daya tarik teknologi pengurang risiko seperti PHT yang dipersepsikan (Feder et al., 1985).

Faktor sosial termasuk koneksi jaringan, keanggotaan kelompok, modal sosial, dan norma komunitas yang mempengaruhi akses informasi, tekanan sebaya, dan kemungkinan tindakan kolektif. Pembelajaran sosial melalui pengamatan pengalaman orang lain dapat secara signifikan mempengaruhi keputusan adopsi. Pemimpin opini dan adopter awal memainkan peran penting dalam mempengaruhi orang lain melalui efek demonstrasi dan pengaruh sosial. Karakteristik komunitas

seperti kohesi sosial, tingkat kepercayaan, dan kapasitas koperasi mempengaruhi kemungkinan adopsi kolektif (Bandiera & Rasul, 2006).

Faktor institusional termasuk aturan formal, norma informal, mekanisme penegakan, dan dukungan organisasi yang membentuk peluang dan kendala untuk adopsi PHT. Layanan penyuluhan, institusi penelitian, pemasok input, dan organisasi pemasaran menyediakan dukungan teknis, informasi, dan akses pasar yang memfasilitasi adopsi. Lingkungan kebijakan termasuk regulasi, subsidi, dan standar menciptakan insentif atau disinsentif untuk adopsi. Hak properti, penegakan kontrak, dan kepercayaan institusional mempengaruhi kemauan untuk melakukan investasi yang terkait dengan adopsi (North, 1990).

Karakteristik teknologi PHT secara signifikan mempengaruhi kemungkinan dan keberhasilan adopsi. Keuntungan relatif mewakili manfaat yang dipersepsikan dari PHT dibandingkan praktik yang ada, termasuk manfaat ekonomi, pengurangan risiko, perbaikan lingkungan, manfaat kesehatan, dan pengakuan sosial. Keuntungan yang dipersepsikan bergantung pada keadaan petani, nilai, dan prioritas, sehingga teknologi yang sama mungkin memiliki tingkat keuntungan yang berbeda untuk petani yang berbeda. Kompatibilitas mengacu pada konsistensi PHT dengan sistem pertanian yang ada, nilai, pengalaman, dan kapabilitas. Kompatibilitas tinggi mengurangi hambatan adopsi sementara inkompatibilitas memerlukan perubahan atau investasi yang lebih ekstensif (Rogers, 2003).

Kompleksitas melibatkan kesulitan memahami dan mengimplementasikan praktik PHT. Teknologi kompleks memerlukan pembelajaran yang lebih ekstensif, pengembangan keterampilan, dan kapabilitas manajemen. Kompleksitas dapat dikurangi melalui pelatihan, alat pendukung keputusan, atau penyederhanaan rekomendasi. Kemampuan uji coba memungkinkan petani untuk bereksperimen dengan praktik PHT pada skala terbatas sebelum adopsi penuh. Divisibilitas memungkinkan petani untuk mengadopsi komponen secara bertahap daripada sekaligus. Kemampuan observasi mengacu pada visibilitas hasil PHT yang memungkinkan petani untuk mengevaluasi kinerja dan orang lain untuk mengamati hasil. Kemampuan observasi yang ditingkatkan memfasilitasi pembelajaran sosial dan efek pengaruh sebaya (Rogers, 2003).

Kerangka jalur dampak memetakan bagaimana adopsi PHT mempengaruhi berbagai hasil melalui mekanisme langsung dan tidak langsung. Dampak teknis langsung termasuk perubahan dalam efektivitas pengendalian hama, efisiensi penggunaan input, tingkat hasil, dan biaya produksi yang dihasilkan langsung dari mengimplementasikan praktik PHT. Dampak ini mungkin bervariasi tergantung pada kualitas implementasi, kondisi lingkungan, dan kompatibilitas dengan sistem yang ada. Efek pembelajaran dapat meningkatkan dampak seiring waktu ketika petani memperoleh pengalaman dan menyempurnakan praktik (Mariano et al., 2012).

Dampak ekonomi dihasilkan dari perubahan teknis yang diterjemahkan menjadi hasil keuangan melalui mekanisme pasar. Pengurangan biaya input, perbaikan hasil, premi kualitas, dan pengurangan risiko berkontribusi untuk meningkatkan profitabilitas. Namun, dampak ekonomi bergantung pada kondisi pasar, hubungan harga, dan kemampuan untuk menangkap premi kualitas. Efek skala dapat mempengaruhi biaya unit dan akses pasar. Efek dinamis termasuk manfaat kumulatif dari perbaikan kesehatan tanah, pembangunan reputasi, atau pengembangan pasar (Kassie et al., 2013).

Dampak lingkungan termasuk perubahan dalam penggunaan pestisida, keanekaragaman hayati, kesehatan tanah, kualitas air, dan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari adopsi PHT. Dampak ini dapat memberikan manfaat barang publik yang tidak tertangkap dalam pengembalian ekonomi pribadi. Dampak lingkungan juga dapat memberikan umpan balik untuk mempengaruhi produktivitas, ketahanan, atau keberlanjutan sistem pertanian. Pengukuran dampak lingkungan memerlukan indikator yang sesuai dan sistem pemantauan yang dapat mendeteksi perubahan pada skala waktu yang relevan. Efek spillover spasial dapat memperluas manfaat lingkungan di luar usahatani yang mengadopsi melalui pengurangan drift pestisida, perbaikan konektivitas habitat, atau perbaikan tingkat daerah aliran sungai (Pretty et al., 2006).

Dampak sosial termasuk perubahan dalam kesehatan petani, kesejahteraan rumah tangga, hubungan komunitas, dan modal sosial yang mungkin dihasilkan dari adopsi PHT. Pengurangan paparan pestisida dapat meningkatkan kesehatan

petani dan pekerja sambil mengurangi biaya perawatan kesehatan. Peningkatan profitabilitas usahatani dapat meningkatkan ketahanan pangan rumah tangga, peluang pendidikan, atau status komunitas. Partisipasi dalam program PHT dapat memperkuat jaringan sosial, membangun kapasitas tindakan kolektif, atau meningkatkan akses untuk peluang pembangunan lainnya. Namun, dampak sosial juga dapat mencakup konsekuensi yang tidak diinginkan seperti peningkatan persyaratan tenaga kerja, konflik sosial tentang praktik yang berbeda, atau pengecualian kelompok tertentu dari manfaat (Dasgupta et al., 2005).

Kerangka mengakui berbagai mekanisme umpan balik yang menciptakan interaksi dinamis antara keputusan adopsi dan hasil. Umpan balik pembelajaran terjadi ketika petani menyesuaikan praktik berdasarkan pengalaman mereka sendiri atau pengamatan orang lain. Hasil positif mendorong adopsi berkelanjutan dan penyempurnaan praktik, sementara hasil negatif dapat menyebabkan modifikasi atau penghentian. Spillover pengetahuan terjadi ketika adopter yang berhasil berbagi informasi dengan tetangga, agen penyuluhan, atau petani lain, mempercepat proses difusi. Umpan balik pasar muncul ketika adopsi luas mengubah kondisi pasar, seperti peningkatan pasokan produk berkualitas tinggi atau pengurangan permintaan pestisida (Foster & Rosenzweig, 1995).

Umpan balik institusional terjadi ketika pola adopsi mempengaruhi kebijakan, regulasi, atau praktik organisasi. Adopsi PHT yang berhasil dapat menyebabkan kebijakan yang mendukung, program penyuluhan yang diperluas, atau pengembangan pasar input khusus. Sebaliknya, tantangan adopsi dapat menghasilkan penyesuaian kebijakan atau modifikasi program. Umpan balik lingkungan melibatkan perubahan dalam kondisi ekosistem yang mempengaruhi peluang dan kendala pertanian masa depan. Peningkatan kesehatan tanah atau keanekaragaman hayati dapat meningkatkan ketahanan sistem dan mengurangi kebutuhan untuk input eksternal. Mekanisme umpan balik ini menciptakan ketergantungan jalur dimana pola adopsi awal mempengaruhi lintasan masa depan (Arthur, 1989).

Kerangka secara eksplisit mengakui bahwa proses adopsi dan hasil sangat bergantung pada konteks, bervariasi di berbagai lokasi geografis, sistem pertanian, kondisi pasar, dan lingkungan institusional. Konteks agroekologis termasuk iklim, tanah, tekanan hama, dan keanekaragaman hayati mempengaruhi kelayakan teknis dan efektivitas praktik PHT. Konteks ekonomi termasuk pengembangan pasar, struktur harga, dan tingkat pendapatan mempengaruhi daya tarik ekonomis adopsi. Konteks sosial termasuk nilai budaya, struktur sosial, dan dinamika komunitas mempengaruhi penerimaan dan implementasi inovasi (Darnhofer et al., 2010).

Konteks institusional termasuk kualitas tata kelola, stabilitas kebijakan, dan kapasitas organisasi mempengaruhi lingkungan yang memungkinkan untuk adopsi inovasi. Konteks historis termasuk pengalaman masa lalu dengan adopsi teknologi, hubungan institusional, dan lintasan pembangunan menciptakan kondisi awal yang mempengaruhi proses adopsi saat ini. Pengakuan ketergantungan konteks mencegah overgeneralisasi dari temuan penelitian dan menekankan kebutuhan untuk pendekatan adaptif yang memperhitungkan kondisi dan kendala lokal (Ostrom, 2009).

Kerangka mendefinisikan batas sistem untuk analisis sambil mengakui interaksi penting dengan sistem yang lebih luas. Analisis tingkat usahatani fokus pada keputusan dan hasil petani individu tetapi mempertimbangkan pengaruh dari tingkat rumah tangga, komunitas, dan pasar. Analisis regional menguji pola adopsi di berbagai usahatani, komunitas, atau rantai nilai untuk memahami dinamika tingkat sistem. Batas temporal mempertimbangkan baik keputusan adopsi jangka pendek maupun implikasi keberlanjutan jangka panjang. Interaksi lintas skala terjadi ketika proses pada satu skala mempengaruhi hasil pada skala lain, seperti keputusan adopsi individu yang teragregasi menjadi perubahan tingkat pasar (Cash et al., 2006).

Analisis antarmuka menguji interaksi antara subsistem yang berbeda, seperti antarmuka produksi-pasar, antarmuka petani-penyuluhan, atau antarmuka kebijakan-praktik. Antarmuka ini sering menentukan apakah inovasi dapat berhasil ditransfer antar sistem dan mungkin memerlukan perhatian khusus untuk memfasilitasi adopsi. Aktivitas spanning batas seperti layanan penyuluhan,

perantara pasar, atau jaringan kebijakan memainkan peran krusial dalam menghubungkan subsistem yang berbeda dan memfasilitasi aliran inovasi (Klerkx & Leeuwis, 2009).

Kerangka pemikiran ini memiliki implikasi penting untuk metodologi penelitian dan pendekatan analisis. Sifat multi-level dari proses adopsi memerlukan pendekatan metode campuran yang dapat menangkap fenomena pada skala dan tingkat organisasi yang berbeda. Metode kuantitatif sesuai untuk mengukur tingkat adopsi, menganalisis determinan, dan menilai dampak, sementara metode kualitatif diperlukan untuk memahami proses pengambilan keputusan, dinamika sosial, dan faktor institusional. Desain penelitian longitudinal diperlukan untuk menangkap aspek dinamis dari proses adopsi dan efek pembelajaran (Creswell & Plano Clark, 2017).

Perspektif sistem memerlukan perhatian pada interaksi, loop umpan balik, dan sifat yang muncul yang mungkin tidak terlihat dalam pendekatan reduksionis. Metode studi kasus dapat memberikan pemahaman yang kaya tentang ketergantungan konteks dan hubungan kausal yang kompleks. Pendekatan penelitian partisipatif dapat melibatkan pemangku kepentingan dalam ko-kreasi pengetahuan dan memastikan relevansi temuan. Pendekatan metode campuran memungkinkan triangulasi temuan dari sumber dan perspektif yang berbeda. Analisis komparatif di berbagai konteks dapat mengidentifikasi pola yang dapat digeneralisasi sambil menghormati spesifisitas konteks (Yin, 2017).

Kerangka memiliki implikasi signifikan untuk desain kebijakan dan implementasi program. Sifat multi-level adopsi menunjukkan kebutuhan untuk intervensi terkoordinasi di berbagai skala daripada pendekatan tingkat tunggal. Intervensi tingkat individu seperti pelatihan atau penyediaan informasi harus dilengkapi dengan perubahan institusional, pengembangan pasar, dan dukungan kebijakan. Pengakuan heterogenitas menunjukkan kebutuhan untuk pendekatan yang berbeda daripada program satu-ukuran-untuk-semua. Strategi penargetan harus mempertimbangkan kecenderungan adopsi, dampak potensial, dan efek spillover (Anderson & Feder, 2007).

Sifat dinamis proses adopsi menunjukkan kebutuhan untuk pendekatan manajemen adaptif yang dapat menyesuaikan intervensi berdasarkan pembelajaran dan keadaan yang berubah. Perspektif jangka panjang diperlukan untuk menangkap manfaat penuh adopsi dan memastikan keberlanjutan. Perspektif sistem menekankan pentingnya membangun kapasitas inovasi daripada hanya mentransfer teknologi spesifik. Ini termasuk memperkuat institusi, membangun jaringan, dan mengembangkan modal manusia yang dapat mendukung proses inovasi berkelanjutan (Klerkx et al., 2012).

Kerangka pemikiran ini memberikan fondasi logis untuk hipotesis penelitian spesifik dalam studi ini. Hipotesis tentang karakteristik petani yang mempengaruhi adopsi berasal dari teori modal manusia dan bukti empiris tentang determinan adopsi. Hipotesis tentang faktor institusional yang mempengaruhi adopsi mencerminkan pentingnya lingkungan yang memungkinkan dalam sistem inovasi. Hipotesis tentang dampak positif adopsi pada efisiensi dan kualitas berasal dari sifat teknis PHT dan prediksi teori ekonomi. Integrasi hipotesis ini dalam kerangka komprehensif memastikan konsistensi dan menyediakan basis untuk analisis komprehensif (Creswell, 2014).

Kerangka juga menunjukkan hipotesis tambahan tentang efek interaksi, mekanisme umpan balik, dan ketergantungan konteks yang dapat meningkatkan pemahaman fenomena adopsi. Ini termasuk hipotesis tentang dampak diferensial di berbagai jenis petani, efek spillover dalam komunitas, atau adaptasi praktik untuk kondisi lokal. Kerangka memberikan panduan untuk operasionalisasi konsep, pemilihan variabel yang sesuai, dan interpretasi temuan dalam konteks teoretis yang lebih luas (Maxwell, 2012).

Arah Penelitian Masa Depan: Kerangka pemikiran ini mengidentifikasi beberapa arah untuk penelitian masa depan yang dapat memajukan pemahaman adopsi teknologi pertanian. Studi longitudinal dapat menguji dinamika proses adopsi, keberlanjutan dampak, dan evolusi sistem inovasi dari waktu ke waktu. Studi komparatif di berbagai konteks dapat mengidentifikasi faktor yang menentukan keberhasilan atau kegagalan intervensi adopsi. Penelitian partisipatif dapat melibatkan petani dalam ko-desain teknologi dan mengembangkan solusi

yang sesuai secara lokal. Analisis jaringan dapat menguji bagaimana informasi dan pengaruh mengalir melalui sistem sosial untuk mempengaruhi keputusan adopsi (Wasserman & Faust, 1994).

Integrasi dengan teknologi yang muncul seperti pertanian presisi, platform digital, atau bioteknologi dapat mengeksplorasi bagaimana alat baru dapat meningkatkan efektivitas PHT atau adopsi. Penelitian perubahan iklim dapat menguji bagaimana pola adopsi dan hasil mungkin berubah dalam skenario lingkungan yang berbeda. Penelitian kebijakan dapat mengevaluasi efektivitas pendekatan intervensi yang berbeda dan mengidentifikasi campuran kebijakan optimal untuk mempromosikan pertanian berkelanjutan. Penelitian scaling dapat menguji bagaimana inovasi lokal yang berhasil dapat diadaptasi dan disebarluaskan ke area atau populasi yang lebih luas (Wigboldus et al., 2016).

2.4. Hipotesis

Berdasarkan tinjauan pustaka dan kerangka pemikiran yang telah dikembangkan, penelitian ini mengajukan hipotesis sebagai berikut:

1. Karakteristik sosial ekonomi petani (umur, pendidikan, pengalaman, luas lahan, pendapatan) berpengaruh signifikan terhadap tingkat adopsi teknologi PHT pada usahatani sayuran dataran rendah.
2. Akses informasi, dukungan penyuluhan, dan ketersediaan input PHT berpengaruh positif terhadap keputusan petani mengadopsi teknologi PHT.
3. Adopsi teknologi PHT berpengaruh positif terhadap efisiensi teknis dan ekonomis usahatani sayuran dataran rendah.
4. Petani yang mengadopsi teknologi PHT menghasilkan produk sayuran dengan kualitas lebih baik dibandingkan petani non-adopter.
5. Terdapat perbedaan signifikan dalam profitabilitas usahatani antara petani adopter dan non-adopter teknologi PHT.