

KONSEP DASAR MODEL SIMULASI

S.M. Sitompul

TUJUAN

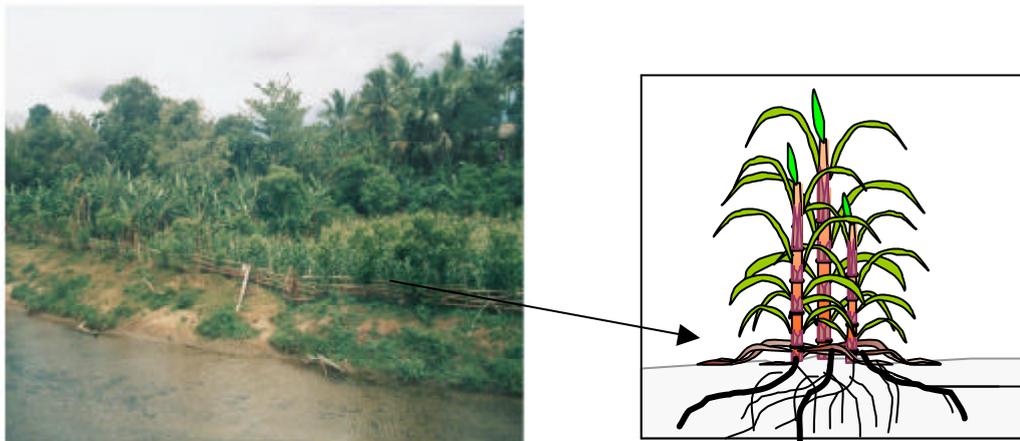
- Untuk menegaskan pengertian dasar dari model sebagai suatu pendekatan dalam studi sistem
- Untuk mengenal model lebih dalam seperti berbagai istilah dalam model dan jenis model yang digunakan untuk studi sistem pertanian sebagai pengantar dalam studi model

1. PENDAHULUAN

1.1 Dunia nyata dan Sistem

Segala sesuatu pasti mengikuti suatu aturan seperti air yang mengalir dari tempat yang tinggi (gunung) ke tempat (dataran) yang rendah. Demikian juga dengan dunia nyata (*real world*) tanaman (Gambar 1) tidaklah muncul begitu saja tapi mengikuti suatu aturan. Karena itu pasti ada teori atau hukum yang dapat menjelaskan dunia nyata seperti tanaman yang tumbuh pada alamnya tanpa gangguan manusia dari mulai bahan tanaman (biji) hingga tanaman dewasa dan masak. Teori yang dapat menggambarkan tingkah-laku dari suatu keadaan, kejadian atau peristiwa yang dipertimbangkan adalah sasaran akhir dari ilmu pengetahuan.

Suatu pendekatan yang tersedia untuk mempelajari dunia nyata adalah pendekatan sistem yaitu studi pengenalan dunia nyata melalui pemilahan dunia nyata tersebut kepada bagian-bagiannya (Gambar 1). Unsur dan proses penyusun bagian-bagian tersebut kemudian diidentifikasi, dikarakterisasi dan selanjutnya dirakit kembali dalam suatu kesatuan struktur (sistem) untuk menghasilkan produk atau tujuan yang dipertimbangkan.



Gambar 1. Semi dunia nyata tanaman (kiri) dan penyederhaanaan dunia nyata melalui pendekatan sistem (kanan)

Jadi sistem adalah bagian dari dunia nyata yang terdiri dari berbagai unsur atau tanaman yang tumbuh pada suatu tempat tertentu (Gambar 1). Komponen dan proses yang saling berinteraksi yang dirancang berdasarkan konsep yang dikembangkan sesuai dengan tujuan yang diinginkan. Sebagai contoh dunia nyata tanaman dapat digambarkan sebagai kumpulan dari berbagai jenis tanaman, individu tanaman, organ tanaman, jaringan tanaman atau sel tanaman. Komponen dan proses yang menyusun individu tanaman dapat dibatasi pada (i) akar yang berfungsi menopang tanaman serta menyerap air dan unsur hara, (ii) batang, cabang dan ranting yang berfungsi untuk menopang bagian tanaman di atas tanah dan sebagai jalur transpor air, unsur hara dan zat organik, dan (iii) daun yang berfungsi untuk fotosintesis. Suatu hal yang perlu diingat adalah bahwa sistem tanaman demikian adalah konsep hasil rekayasa pikiran manusia karena tanaman tidak pernah “mengatakan” ini daun, batang dan akar. Jadi dunia nyata itu sesungguhnya tidak pernah diketahui “jika memang itu ada (Van Noordwijk, tidak dipublikasikan)”.

Sistem yang berhubungan dengan tanaman sangat kompleks dan hanya mungkin dipelajari dengan cara penyederhanaannya. Suatu sistem kecil saja dalam suatu individu tanaman sudah cukup kompleks seperti penggunaan suatu unsur hara dalam pertumbuhan tanaman. Sistem ini dapat melibatkan penyerapan unsur hara oleh akar, transpornya dari sel ke sel yang jumlahnya tidak terbayangkan dan penggunaannya dalam metabolisme. Bayangkan betapa sangat kompleksnya sistem suatu tanaman jika semua unsur hara dan proses lain yang terlibat dalam pertumbuhan dipertimbangkan. Sementara studi tanaman tidak terbatas pada individu tanaman, tapi sampai pada tingkat pertanian (kumpulan tanaman). Sistem pertanian akan semakin luar biasa kompleksnya apabila pertanian tersebut terdiri dari spesies tanaman yang berbeda dengan sifat yang berbeda seperti sistem tumpang sari dan agroforestri. Pada sisi lain, pengetahuan yang memadai dari sesuatu sistem merupakan syarat dasar untuk dapat mengembangkan upaya yang diperlukan untuk memperbaiki atau mengembangkan sistem.

1.2 Model Sistem

Apakah itu model? adalah pertanyaan mendasar dalam upaya penegasan pengertian model. Sesungguhnya pengertian model yang digunakan dalam konteks ini tidak berbeda jauh dari pengertian sehari-hari yaitu *contoh* yaitu sesuatu yang mewakili atau menggambarkan yang dicontoh. Jadi **model** adalah contoh sederhana dari sistem dan menyerupai sifat-sifat sistem yang dipertimbangkan, tetapi tidak sama dengan sistem. Penyederhanaan dari sistem sangat penting agar dapat dipelajari secara seksama. Model dikembangkan dengan tujuan untuk studi tingkah-laku sistem melalui analisis rinci akan komponen atau unsur dan proses utama yang menyusun sistem dan interaksinya antara satu dengan yang lain. Jadi pengembangan model adalah suatu pendekatan yang tersedia untuk mendapatkan pengetahuan yang layak akan sistem tanaman. Model berperan penting dalam pengembangan teori karena berfungsi sebagai konsep dasar yang menata rangkaian aturan yang digunakan untuk menggambarkan sistem. Ini jelas pada pernyataan yang dikemukakan oleh Hawking (1993) bahwa

a theory is just a model of the universe,....., and a set of rules that relate quantities in the model to observations ...

.....
A theory is a good theory if it satisfies two requirements: It must accurately describe a large class of observations on the basis of a model, and it must make definite predictions about the results of future observations

Dalam konteks tanaman, De Wit *et al.* (1978) mengemukakan bahwa model simulasi, jika berguna, berfungsi sebagai jembatan antara reduksionis, yang menganalisis proses secara

terpisah dari landasan fisik dan kimianya, dengan generalis yang tertarik pada ragaan sistem secara keseluruhan dengan setiap proses yang terlibat bekerja pada kondisi alaminya. Jones *et al.* (1987) mengemukakan dua sasaran pokok dari modeling yaitu pertama untuk memperoleh pengertian yang lebih baik mengenai hubungan sebab-akibat (*cause-effect*) dalam suatu sistem, serta untuk menyediakan interpretasi kualitatif dan kuantitatif yang lebih baik akan sistem tersebut. Sebagai contoh, seseorang dapat tertarik untuk mengembangkan suatu model kuantitatif dari fotosintesis tanaman pada lingkungan dengan konsentrasi karbon dioksida (CO_2) dan suhu yang berubah dengan waktu. Ini diperlukan untuk membantu menginterpretasi tanggapan tanaman terhadap perubahan lingkungan atau perubahan global. Model demikian akan bersifat sebagai hipotesis dari pengembang model tersebut, dan karenanya percobaan yang dirancang khusus diperlukan untuk menguji kelayakan atau sebaliknya dari hipotesis tersebut. Hasil akhir dari studi ini adalah pengembangan model yang memperbaiki kapabilitas pengembang model tersebut untuk memprediksi tanggapan tanaman. Ini dapat disebut sebagai sasaran yang diorientasikan pada penelitian (*research-oriented goal*) karena hasil utama upaya ini adalah peningkatan pengetahuan.

Sasaran kedua dari modeling lebih terapan atau berorientasi pada masalah yaitu untuk mendapatkan prediksi yang lebih baik akan tingkah-laku dari sistem yang digunakan segera dalam perbaikan pengendalian atau pengelolaan sistem. Sebagai contoh, suatu kelompok peneliti dari lintas disiplin dapat mengembangkan suatu model untuk digunakan dalam suatu sistem pengairan dengan pengendalian yang dikomputerisasi. Hasil akhir dari upaya ini adalah perangkat lunak yang dirancang untuk penerapan langsung. Tetapi sanggahan dapat timbul mengenai perbedaan diantara kedua sasaran dari studi model tersebut karena model yang diorientasikan pada penelitian dapat juga diterapkan.

Dalam studi tanaman, penggunaan model dapat diperlukan akibat kompleksitas sistemnya karena adanya sifat acak faktor yang terlibat di dalamnya. Tanaman yang tumbuh pada alamnya jauh dari jangkauan penelitian, karena penelitian umumnya melibatkan gangguan pada tanaman betapapun kecilnya. Pendekatan ini sudah dimulai sejak penerapan statistik dalam pelaksanaan percobaan. Penerapan model matematik dalam studi tanaman dimulai beberapa dekade yang lampau, dan berbagai model tanaman sudah dikembangkan seperti model tanaman padi, jagung dan kedelai. Penerapan model matematik belakangan ini semakin menarik banyak perhatian dalam bidang pertanian berkaitan dengan keinginan untuk mendapatkan informasi kuantitatif dan peningkatan kompleksitas pertanian seperti akibat pemanasan global (*global warming*) dan penerapan agroforestri.

2. TERMINOLOGI

2.1 Sistem dan Model

Suatu sistem adalah suatu kumpulan dari komponen atau unsur yang dianggap sebagai penyusun dari bagian dunia nyata yang dipertimbangkan, dan unsur tersebut berhubungan satu sama lain dan dikelompokkan untuk tujuan studi dari bagian 'dunia nyata' tersebut. Seleksi dilakukan terhadap unsur penyusun sistem berdasarkan tujuan studi, karenanya sistem hanya merupakan wakil dari bentuk sederhana realita.

Model dapat dibatasi sebagai konsep (matang atau masih dalam tahap pengembangan) dari sistem yang disederhanakan. Jadi model dapat dianggap sebagai substitusi (pengganti) untuk sistem yang dipertimbangkan dan digunakan apabila lebih mudah bekerja dengan substitut tersebut dari dengan sistem yang sesungguhnya. Aktivitas dalam kehidupan sehari-hari hampir tidak luput dari penggunaan model seperti kapal terbang yang terbuat

dari kertas. Model ini mudah dirangkai dan digunakan serta menarik untuk objek percobaan. Selama percobaan yang dapat dilakukan berulang-ulang, hasilnya diamati dan dipelajari dan dapat sampai kepada suatu kesimpulan bahwa kapal terbang kertas tidak dapat dibuat terbang lebih jauh dengan hanya melemparkannya lebih kuat. Studi ini juga menghasilkan bahwa kapal terbang kertas nampaknya mengikuti suatu lintasan luncuran alami di udara.

Model yang kebanyakan digunakan dalam kehidupan sehari-hari adalah model informal. Seseorang yang akan melakukan pekerjaan selalu didahului dengan konsep dalam pikiran tentang apa yang akan dikerjakan. Khayalan yang ada dalam pikiran kita adalah representasi sederhana dari suatu sistem yang kompleks yang kadang-kadang disebut model mental (*mental model*). Dalam kayalan tersebut, beberapa perhitungan sederhana dapat terlibat. Tetapi pada hakekatnya, model tidak harus kuantitatif yang melibatkan banyak rumus matematika, tapi dapat berupa model mental. Senge (1990) menguraikan model mental sebagai “generalisasi asumsi yang melekat secara mendalam (*deeply ingrained*), atau bahkan gambaran serta bayangan yang mempengaruhi bagaimana kita memahami dunia dan bagaimana kita bertindak”.

Sebagai gambaran dari model metal adalah yang diterapkan seorang Ibu rumah tangga yang akan terjun ke dapur untuk memasak. Si Ibu pasti sudah mempunyai gagasan dalam pikiran apa yang akan dibuat atau produk apa yang akan dihasilkan; misalnya rawon, soto madura, mi goreng atau ikan teri sambal. Proses pembuatannya, yang tentu sudah dikuasai, akan dijabarkan dalam pikiran misalnya kalau ini diiris, itu digiling dan dicampur dengan sesuatu, kemudian semuanya digoreng sampai matang, maka produk yang diinginkan akan diperoleh. Tentu saja si Ibu akan memeriksa apakah bahan-bahan dan perangkat lain yang diperlukan tersedia. Ini adalah suatu bentuk model mental yang tidak dinyatakan dalam tulisan. Jadi si Ibu adalah ahli dalam model, dan hampir semua kita sudah melibatkan model dalam bidang kita masing-masing. Seseorang yang bekerja tanpa model dapat tidak akan mempunyai sasaran yang jelas dan kerangka kerja yang sistematis dan akhirnya dapat seperti “kayu yang hanyut terbawa arus sungai” yang semuanya tergantung pada apa katanya alam. Van Noordwijk (tidak dipublikasikan) menyatakan

“without models, we cannot make sense out of experiment or design them in a sensible way. Without experiments, our models will remain castle in the air”.

Seandainya ada seorang ahli matematik bekerja sama dengan ahli makanan menterjemahkan pekerjaan si Ibu tadi ke bahasa matematik, maka sejumlah rumus matematik yang rumit akan dihasilkan. Sebagai contoh, jika bagian masak dari ikan yang digoreng per satuan waktu selama penggorengan dinyatakan dalam bahasa matematik maka akan tampak seperti berikut.

$$\frac{dI}{dt} = kIE \tag{1}$$

dimana δI = tambahan bagian ikan yang masak, δt = tambahan waktu, k = konstanta dan E adalah energi (panas). Persamaan itu menegaskan bawah tambahan bagian ikan yang masak dengan pertambahan waktu tertentu tergantung pada besarnya ikan (I) dan besarnya energi panas (E) yang digunakan untuk menggoreng. Jika besarnya api konstan selama memasak, yang sangat mungkin terjadi sekarang ini dengan alat masak listrik dan gas, maka kE dapat disatukan menjadi K . Dengan integrasi persamaan diatas dan penataan tertentu, suatu persamaan yang menghubungkan kematangan ikan dengan waktu dapat dihasilkan yaitu

$$I = I_M(1 - e^{-Kt}) \tag{2}$$

dimana I_M adalah kematangan maksimum yang diharapkan. Persamaan ini akan kompleks dengan segera karena ahli matematik tadi menyadari bahwa kematangan ikan pada bagian luar dan dalam ternyata tidak seragam, dan apalagi kalau tindakan si Ibu yang membuat beberapa sayatan untuk menghasilkan kematangan yang lebih merata dipertimbangkan.

2.2 Batas Sistem

Batas sistem adalah abstraksi dari batas yang menghimpun unsur dan proses dari sistem sebagai bagian terpisah lingkungan total. Unsur dalam sistem dipengaruhi oleh lingkungan, tapi sebaliknya komponen tidak mempengaruhi lingkungan. Sebagai contoh dalam model tanaman, faktor lingkungan seperti radiasi matahari dan suhu mempengaruhi fotosintesis, tetapi keadaan sebaliknya tidak terjadi yaitu fotosintesis mempengaruhi factor lingkungan. Ini tidak seluruhnya benar, kare tanaman dapat mempengaruhi iklim mikro dan mungkin factor iklim lain pada tingkat yang sangat kecil yang biasanya diabaikan dalam penerapan studi sistem.

Salah satu pengaruh dari tanaman terhadap lingkungan yang telah dikuantifikasi adalah pengaruh naungan tajuk tanaman, yang dinyatakan dalam ILD (indeks luas daun), terhadap tingkat evaporasi air dari tanah (E_s). Suatu model telah dikembangkan untuk itu yang dikendal dengan Model Ritchie (Blad, 1983) seperti berikut.

$$E_s = \left(\frac{m}{m + \gamma} \right) R_{ns} = \left(\frac{m}{m + \gamma} \right) R_n \cdot e^{-0.4 \text{ILD}} \quad (3)$$

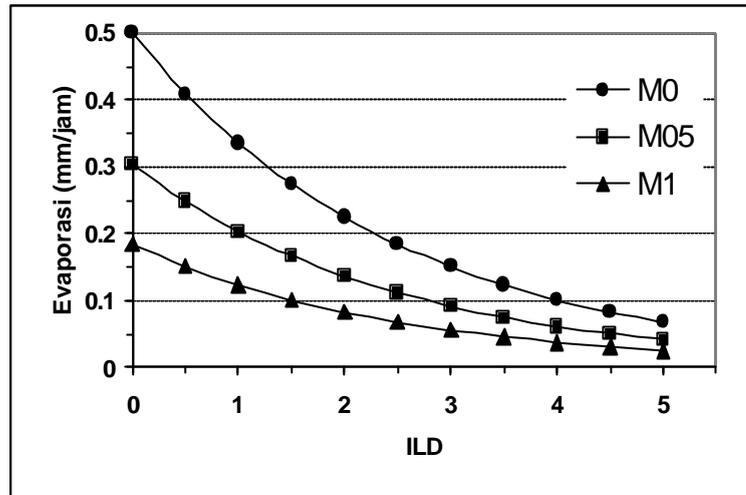
dimana R_{ns} = radiasi bersih pada permukaan tanah, R_n = radiasi bersih, m = sudut lereng dari hubungan tekanan uap air jenuh (e_{sa}) dengan suhu, γ = konstanta psychrometer ($\gamma = PC_p/LM_w/M_a = 0.66 \text{ mb}^0\text{C}^{-1}$ pada suhu 20^0C dan $P = 1000 \text{ mb}$; M_w = berat molekul uap air, M_a = berat molekul udara, C_p = panas spesifik udara pada tekanan tetap dan L = panas laten penguapan). Dengan modifikasi eksponen dari persamaan diatas, pengaruh mulsa dapat dievaluasi yaitu

$$E_s = \left(\frac{m}{m + \gamma} \right) R_n \cdot e^{-0.4(\text{ILD} + 2.5M)} \quad (4)$$

Persamaan di atas menegaskan bahwa evaporasi air dari tanah akan menurun dengan peningkatan penutupan tanah baik oleh naungan tajuk maupun mulsa (Gambar 2).

Berdasarkan harga parameter persamaan di atas, peningkatan luas daun hingga $\text{ILD} = 2$ dapat menekan kehilangan lengas tanah melalui evaporasi lebih dari 50%. Pengaruh mulsa dalam persamaan ini jauh lebih besar dari pengaruh ILD sebagaimana ditunjukkan oleh penurunan evaporasi lebih dari 60% dengan pemberian mulsa yang menutupi semua permukaan tanah (M_1), sementara peningkatan $\text{ILD} = 1$ hanya menurunkan evaporasi sedikit diatas 30%. Pengaruh ketebalan mulsa belum dipertimbangkan dalam persamaan tersebut. Jadi optimalisasi penggunaan air, yang sangat penting pada kondisi penyediaan air yang terbatas seperti pada lahan kering, dapat dilakukan dengan penggunaan mulsa. Tetapi pemacuan pertumbuhan awal vegetatif dapat lebih penting yang menunjang pertumbuhan selanjutnya dari pemberian mulsa yang sulit diperoleh. Taksiran evaporasi dengan persamaan (4) diatas dapat diperbaiki melalui pengalihan ruas kanan persamaan dengan parameter α yaitu

$$\alpha = 0.92 + 0.4 \frac{R_{ns}}{R_n} \quad (5)$$



Gambar 2. Hubungan diantara tingkat evaporasi dengan ILD pada tingkat penutupan tanah oleh mulsa yang berbeda. M0, M05 & M1 (permukaan tanah ditutupi mulsa 0, 50 & 100%), $R_n = 1 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1} = 1 \text{ mm.jam}^{-1}$ (air yang dievaporasikan) dan $[m/(m+\gamma)] = 0,5$

2.3 Peubah dan Parameter

Peubah keadaan (*state variables*) adalah kuantitas yang menggambarkan kondisi komponen dalam sistem yang dapat nyata seperti berat atau abstrak seperti fase perkembangan dan dapat berubah dengan waktu sebagaimana sistem berinteraksi dengan lingkungan. Sebagai contoh, kandungan air tanah dan biomassa tanaman adalah peubah keadaan yang berubah dengan waktu dalam kebanyakan model tanaman. Suatu model dapat mempunyai satu atau banyak peubah keadaan untuk menggambarkan sifat tanaman yang berubah dengan waktu. Peubah keadaan sangat penting dalam model tanaman karena inilah sifat dinamis tanaman yang menarik perhatian dari pengembang model.

Peubah keadaan bersifat masukan pada model seperti faktor lingkungan yang mempengaruhi tingkah-laku sistem, dan juga dikenal sebagai peubah penggerak (*driving variables*). Jika suatu sistem tidak mempunyai masukan, itu berarti tidak dipengaruhi oleh lingkungan dan diacu sebagai sistem tertutup (*closed sistem*). Sistem terbuka (*open sistem*) mempunyai satu atau lebih masukan yang dapat berubah dengan waktu. Sebagai contoh air tanah dapat dibuat sebagai masukan pada model tanaman tanpa melibatkan komponen tanah jika data tersebut tersedia atau dapat dimonitor secara terus-menerus. Tetapi komponen tanah biasanya dilibatkan karena kesulitan memonitor air tanah pada tempat yang berbeda yang menjadi tempat penerapan model. Pada prakteknya, hujan yang lebih mudah dimonitor digunakan sebagai masukan pada model tanaman dalam penaksiran kadar air tanah.

Parameter adalah karakteristik dari unsur model atau peubah laju (*rate variables*) dari persamaan yang digunakan dalam model dan biasanya bersifat tetap (konstan) selama masa simulasi. Sebagai contoh, parameter dapat membatasi tanggapan fungsi fotosintesis pada cahaya, tahanan pada aliran air tanah, atau respirasi dalam sintesis biomassa. Parameter dapat dibuat sebagai masukan, sehingga kadang-kadang perbedaan antara masukan dan parameter tidak selalu jelas. Umumnya masukan tergantung langsung pada waktu,

sementara parameter adalah relatif konstan tergantung pada keadaan sistem. Penggunaan diagram komponen dianjurkan untuk menghubungkan komponen, masukan, keluaran, dan batas sistem dalam sistem.

2.4 Proses

Hubungan timbal-balik diantara komponen dalam suatu sistem, dan karenanya diantara peubah keadaan terjadi sebagai hasil dari berbagai proses. Misalnya, peubah keadaan biomasa tanaman berubah sebagai hasil dari proses fotosintesis dan respirasi, dan air tanah berubah sebagai hasil dari hujan dan evapotranspirasi. Suatu model tanaman adalah serangkaian hubungan matematik yang menggambarkan perubahan dalam peubah keadaan sebagai hasil dari berbagai proses yang terjadi.

Pada umumnya sistem lebih banyak dilihat dari produk yang dihasilkan dengan masukan yang diberikan, sedang perhatian terhadap proses sangat terbatas. Ini tercermin dari hubungan empiris antara suatu dengan lain peubah baik dalam bentuk kualitatif maupun kuantitatif yang banyak digunakan tanpa pemahaman yang memadai akan landasan proses dari hubungan tersebut. Produk, sebagai tujuan akhir, adalah hasil dari proses yang bekerja dalam sistem mengolah masukan dibawah kendali faktor lingkungan sistem. Tanpa penguasaan proses yang layak, tindakan yang diambil untuk mendapatkan hasil yang diharapkan dari suatu sistem akan bersifat spekulatif atau coba-coba. Ini dapat tidak efektif dan hasil yang diperoleh lebih banyak digantungkan kepada "nasib" yaitu, dalam konteks ilmiah, faktor yang diluar jangkauan. Dengan pengetahuan yang lebih baik akan proses, suatu tindakan yang diambil akan memberikan hasil yang mendekati kenyataan. Masalah lain yang dapat timbul dengan keadaan demikian adalah kesulitan dalam melacak faktor yang menyebabkan suatu fenomena yang menyimpang dari biasa.

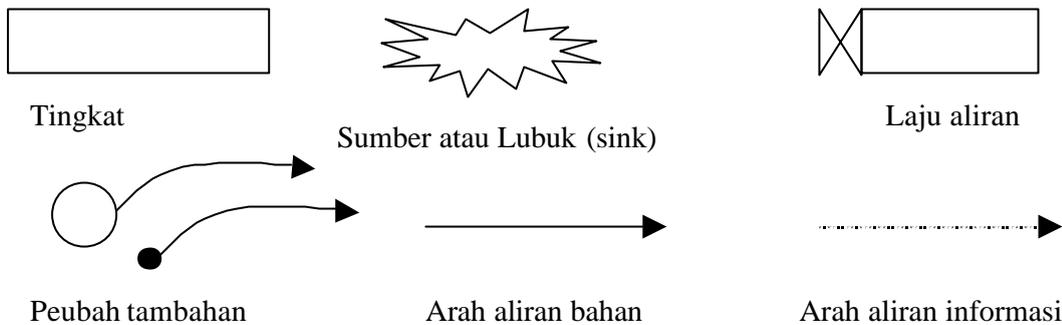
Kekurangan perhatian terhadap proses dapat dihubungkan dengan sifat ekonomis dari manusia, disamping mungkin keterbatasan pengetahuan, yang berusaha mendapat hasil yang sebanyak mungkin dengan upaya yang sekecil mungkin dan dalam waktu yang sesingkat mungkin. Hasil yang maksimal diperoleh dari sistem yang bekerja secara optimal yang berarti semua unsur yang ada dalam sistem bekerja pada tingkat optimal. Karena itu tabiat semua unsur yang menyusun sistem dalam suatu proses yang terintegrasi dibawah kendali faktor lingkungan harus dikuasai dengan baik. Ini memang membutuhkan banyak tenaga, pikiran dan waktu yang semuanya dapat diwujudkan dalam bentuk biaya atau pengorbanan. Pengetahuan yang rinci akan tabiat setiap unsur dari suatu sistem dapat melibatkan studi setiap unsur secara tersendiri. Pendekatan modeling, yang menyederhanakan sistem sedemikian rupa, tetapi dengan hasil yang tidak berbeda dengan hasil dari sistem, menjadi sangat penting. Ini dicapai dengan membatasi unsur yang dilibatkan pada yang memainkan peranan penting dalam model simulasi.

2.5 Simbol Diagram

Simbol yang digunakan belakangan ini dalam menggambarkan diagram alir suatu model cukup beragam. Pada awal perkembangan model matematik yang melibatkan komputer, simbol Forester adalah yang paling banyak digunakan (Gambar 3). Pada hakekatnya, simbol yang digunakan bersifat bebas yang penting adalah konsistensi penggunaan simbol.

Pengertian dari simbol Forester perlu disimak sebagai langkah awal dalam pengembangan model. Tingkat (level) dengan simbol kotak empat persegi digunakan untuk menggambarkan peubah keadaan pada suatu waktu tertentu. Peubah sistem yang dapat digolongkan menjadi peubah keadaan adalah bagian yang tetap ada apabila sistem tersebut

tiba-tiba dihentikan (dibekukan). Dalam kehidupan sehari-hari, tabungan dalam Bank dan air dalam suatu lubang pada suatu aliran sungai merupakan contoh dari peubah keadaan. Sumber dan lubang (sink) mewakili lingkungan sistem, dan aliran dapat terjadi dari sumber ke model dan dari model ke lubang tanpa mempengaruhi lingkungan. Simbol laju (*rate*) aliran menggambarkan tingkat aliran diantara bagian (komponen). Peubah pembantu (*auxiliary*) dengan simbol lingkaran kecil mewakili faktor yang mempengaruhi laju aliran seperti masukan dan parameter.

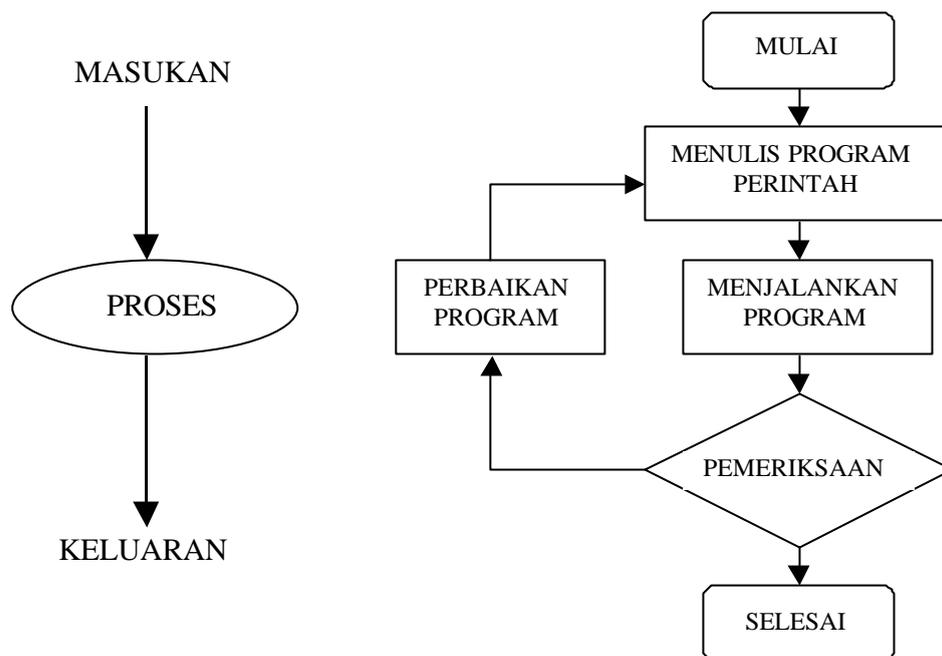


Gambar 3. Simbol Forrester yang digunakan dalam diagram alir model

2.6 Simulasi dan Program Komputer

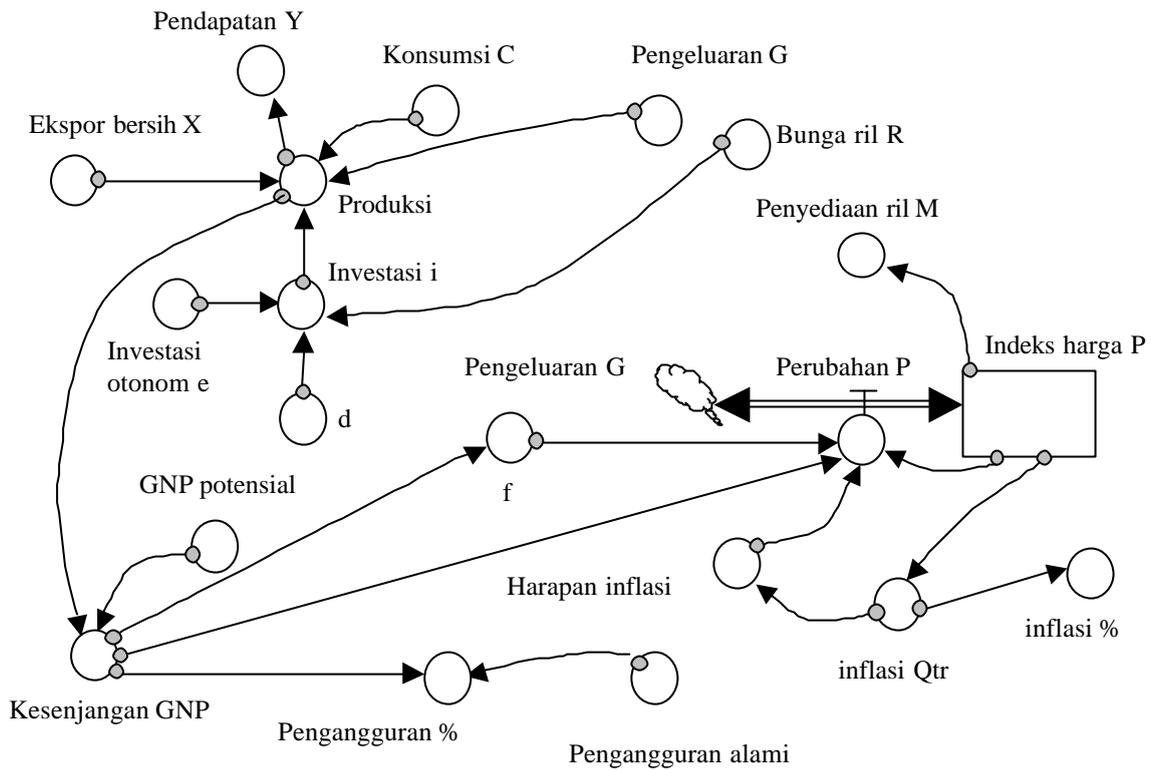
Simulasi adalah proses yang diperlukan untuk operasionalisasi model, atau penanganan model untuk meniru tingkah-laku sistem yang sesungguhnya. Ini meliputi berbagai kegiatan seperti penggunaan diagram alir dan logika komputer, serta penulisan kode komputer dan penerapan kode tersebut pada komputer untuk menggunakan masukan dan menghasilkan keluaran yang diinginkan. Pada prakteknya, modeling dan simulasi adalah proses yang berhubungan sangat erat, dan beberapa penulis membuat batasan simulasi yang mencakup modeling.

Program komputer adalah perangkat lunak yang tersedia dalam komputer yang digunakan untuk mengolah masukan menjadi keluaran melalui proses tertentu. Proses tersebut dinyatakan dalam bentuk perintah (instruksi) yang dikenal komputer, dan ini tergantung pada program komputer yang digunakan. Jadi langkah utama yang diperlukan untuk membuat model adalah penulisan perintah untuk masukan data, pengolahan data dan keluaran dari hasil pengolahan data (Gambar 4). Bahasa yang dapat digunakan untuk menulis perintah dalam komputer dapat dibagi dua jenis yaitu bahasa tingkat rendah dan tinggi. Bahasa program tingkat rendah, yang berorientasi pada mesin dengan penggunaan kode 0 dan 1, sangat sulit diterapkan. Bahasa program tingkat tinggi, yang berorientasi pada bahasa manusia dan mudah diterapkan, dikembangkan kemudian seperti BASIC (QBASIC), PASCAL dan FORTRAN. Bahasa program inilah yang umumnya digunakan dalam pengembangan model tanaman.

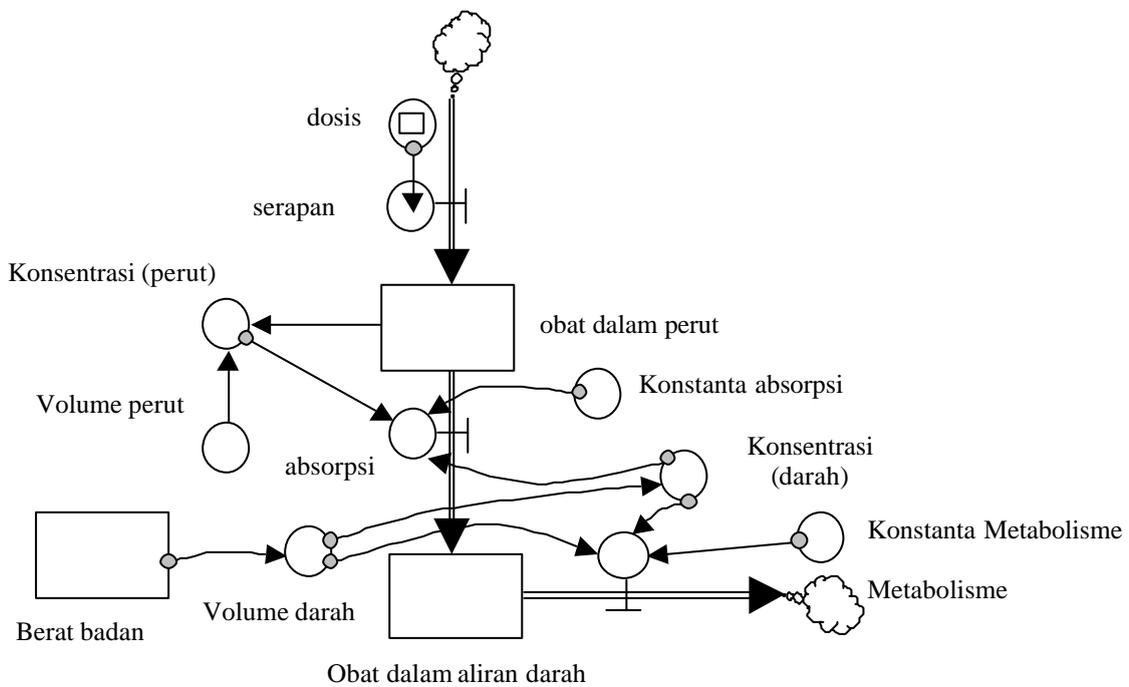


Gambar 4. Bagan sederhana kerja program komputer dan langkah kerja pembuatan model

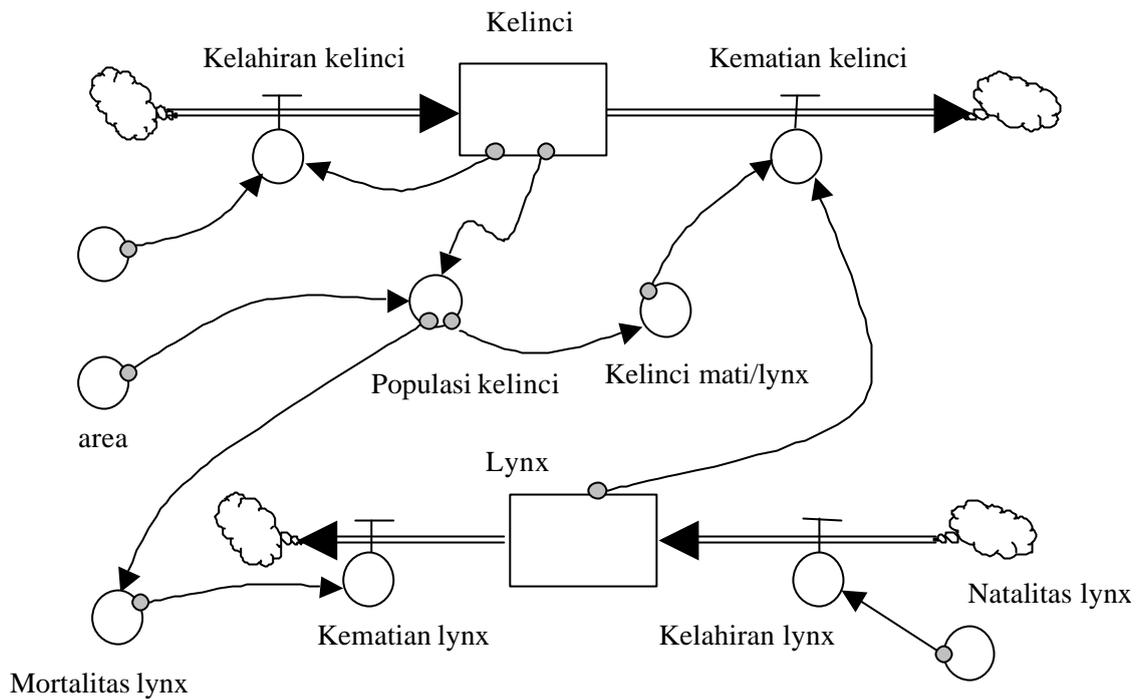
Program dengan bahasa yang lebih komunikatif dikembangkan belakangan ini yang melibatkan bahasa gambar seperti yang terdapat dalam program STELLA. Beberapa model berikut ini merupakan contoh penampilan luar dari model yang dikembangkan dengan program Stella. Model Makroekonomi (Gambar 5) meniru perilaku sebagian dari sistem makro-ekonomi untuk mempelajari misalnya perubahan tingkat pendapatan, bunga, pengangguran dan inflasi akibat perubahan dari berbagai faktor dan proses yang dipertimbangkan dalam sistem makro-ekonomi tersebut. Model “*Pharmacokinetic Processes*” (Gambar 6) meniru perilaku tubuh yang berhubungan dengan penyerapan dan metabolisme dari suatu obat. Ini dapat meningkatkan pemahaman akan konsentrasi obat dalam aliran darah yang efektif dan bersifat toksis. Model Ekologi (Gambar 7) meniru dinamika populasi mangsa (prey) dan pemangsa (predators) berdasarkan tingkat kelahiran dan kematian, kepadatan populasi serta persediaan makanan dalam suatu sistem.



Gambar 5. Ragaan dari Model makroekonomi (sebagian) untuk studi pendapatan, bunga, pengangguran dan inflasi akibat pengaruh dari perilaku berbagai faktor yang dipertimbangkan mengikuti Program Stella (diangkat dari Stella 5)



Gambar 6. Keragaan Model "Pharmacokinetic Process" dari suatu obat yang membutuhkan penanganan khusus dalam dosis menggunakan simbol dari Program Stella (diangkat dari Stella 5)



Gambar 7. Keragaan Model dinamika populasi mangsa (kelinci) dan pemangsa (lynx, sejenis kucing liar) menggunakan simbol dari Program Stella (diangkat dari Stella 5)

3. Jenis Model

3.1 Model Matematik

Model matematik adalah salah satu jenis model yang banyak digunakan pada tanaman dan dicirikan oleh persamaan matematik yang terdiri dari peubah dan parameter. De Wit (almarhum) dari Department of Theoretical Crop Production, Wageningen University (Belanda) adalah salah seorang yang berjasa dalam pengembangan model matematik pada bidang pertanian. Sebagai contoh model matematik yang digunakan untuk menggambarkan tingkah-laku dari suatu sistem adalah perubahan jumlah air dalam bak sebagai akibat aliran air dari satu ke bak ke bak lain (Gambar 8).

Persamaan yang dapat digunakan untuk menggambarkan sistem ini adalah

$$\frac{\delta V_1}{\delta t} = i(t) - f_{1,2}(t) \quad (6a)$$

$$\frac{\delta V_2}{\delta t} = f_{1,2}(t) - O(t) \quad (6b)$$

Karena aliran dari setiap bak dikendalikan oleh suatu pintu air (*orifice*), sehingga tingkat aliran proporsional dengan akar dari tinggi permukaan air diatas orifice dikalikan dengan 2 dan konstanta gravitasi seperti berikut.

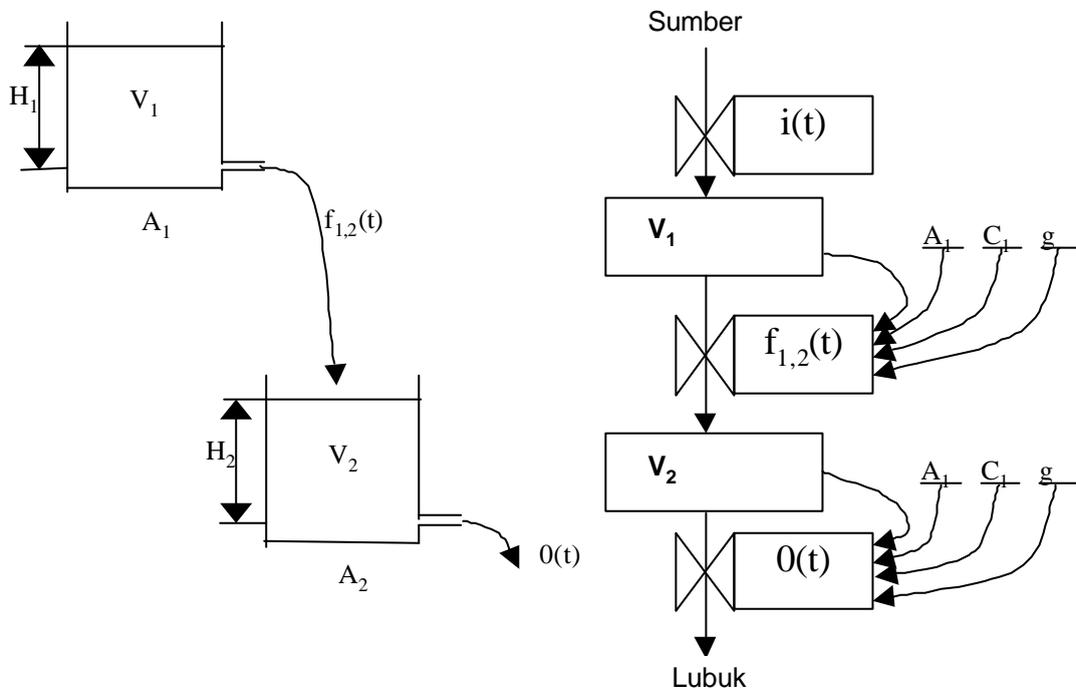
$$f_{1,2}(t) = C_1 \sqrt{2gH_1} \quad 0(t) = C_2 \sqrt{2gH_2} \quad (7)$$

Karena H_1 dan H_2 dapat dinyatakan masing-masing sebagai fungsi dari V_1 dan V_2 , maka pers (1) diatas dapat ditulis seperti berikut

$$\frac{\delta V_1}{\delta t} = i(t) - C_1 \sqrt{2gV_1 / A_1} \quad (8)$$

$$\frac{\delta V_2}{\delta t} = C_1 \sqrt{2gV_1 / A_1} - C_2 \sqrt{2gV_2 / A_2} \quad (9)$$

Saat pengembangan persamaan struktur dan komponen seperti contoh diatas, sikap hati-hati harus dilakukan pada konsistensi dimensi dari hubungan. Pembuat model harus memastikan bahwa semua parameter, masukan, peubah dan proses mempunyai dimensi dan satuan yang sama, kalau tidak model yang dihasilkan akan tidak berarti.



Gambar 8. Sistem aliran air pada dua bak (kiri) dan diagram alir yang sepadan berdasarkan notasi Forester

3.2 Model Kontinu dan Diskret

Model tanaman biasanya diklasifikasikan sebagai model kontinu yang dicirikan oleh peubah keadaan yang berubah secara perlahan dalam selang waktu yang relatif pendek dan tidak terbatas pada bilangan bulat (*integer*). Di lain pihak, model diskret adalah model dengan peubah yang menggambarkan keadaan sistem dengan bilangan bulat. Sebagai contoh, suatu model pengoperasian alat bongkar muatan biji dapat mensimulasi pembongkaran muatan truk dan jumlah yang menunggu untuk dibongkar. Model diskret biasanya membutuhkan informasi tentang waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan kegiatan seperti

pembongkaran muatan suatu truk. Sebaliknya, model kontinu membutuhkan informasi mengenai proses seperti tingkat aliran bahan atau energi diantara komponen dan diantara komponen dengan lingkungan. Model diwakili oleh serangkaian persamaan diferensial yang diturunkan dari struktur sistem dan saling berhubungan diantara komponennya.

Modeling sistem kontinu adalah suatu pendekatan yang berorientasi proses dalam penggambaran tingkah-laku suatu sistem. Proses dapat dibagi tiga bagian yaitu transpor atau aliran (*flow*), transformasi dan simpanan (*storage atau stock*). Proses ini digambarkan oleh dua kelas peubah yang kadang-kadang disebut peubah ekstensif (*extensive variables*) dan peubah intensif (*intensive variables*). Peubah ekstensif dicirikan oleh aliran kuantitas seperti aliran massa, volume, muatan listrik, dan panas. Peubah intensif, yang merupakan ukuran dari intensitas energi atau potensial, mewakili tenaga penggerak peubah ekstensif seperti tekanan, suhu, voltase dan kecepatan (*velocity*).

Identifikasi peubah ekstensif dan intensif serta komponen sistem perlu dilakukan secara cermat, dan diagram sistem dapat digunakan untuk menurunkan persamaan atau model matematik dari sistem. Karena kesamaan peubah ekstensif dan intensif diantara sistem, metode yang sama dapat digunakan untuk membentuk model untuk masing-masing sistem, dan model matematik yang sama dari suatu sistem dapat digunakan pada sistem yang lain. Salah satu kesulitan dalam mengembangkan model di bidang pertanian dan biologi dengan metode ini berasal dari fakta bahwa peubah intensif tidak diketahui

3.3 Model Empiris dan Mekanistik

Model empiris diperoleh biasanya dari pengalaman, seperti hasil pengamatan, dan digunakan untuk menggambarkan suatu atau sebagian tingkah-laku sistem yang dipelajari. Sementara, model mekanistik mencoba memberikan deskripsi sistem berdasarkan pemahaman akan tingkah-laku dari sistem tersebut atau mekanisme yang dipertimbangkan. Pada umumnya, orang yang mengembangkan model empiris bekerja hanya pada satu tingkat hirarkhi organisasi sistem keseluruhan, dan menurunkan persamaan yang menghubungkan satu komponen dengan komponen lain pada tingkat yang sama dalam sistem tersebut. Sebaliknya, model mekanistik dikembangkan untuk mencoba menggambarkan tingkah-laku dari komponen sistem (*attributes*) pada tingkat hirarkhi yang berbeda seperti komponen pada tingkat i dengan komponen pada tingkat $i-1$. Kedua tingkatan tersebut dihubungkan oleh proses analisis dan resinsntesis yang diikuti dengan asumsi dan hipotesis. Deskripsi tingkah-laku pada tingkat $i-1$ dapat murni empiris (berdasarkan pengalaman) dan tidak mengandung unsur yang berada pada tingkat hirarkhi yang lebih bawah ($i-2$), atau sebagian empiris dan sebagian lagi mekanistik.

Salah satu fakta yang harus diingat adalah bahwa model mekanistik jarang secara murni mekanistik dan lebih sering sebagian didasarkan atas model empiris. Kenyataan lain adalah bahwa model empiris dapat memberikan hasil yang lebih baik dari model mekanistik. Ini terjadi karena model empiris lebih mudah diturunkan dengan hanya sedikit kendala dibandingkan dengan model mekanistik.

3.4 Model Statis dan Dinamis

Model statis adalah model yang tidak melibatkan waktu sebagai peubah, sehingga perubahan sistem dengan waktu tidak diketahui. Karena hampir tidak ada aspek yang tidak berubah dengan waktu betapapun kecil tingkat perubahannya, suatu model statis hanya bersifat aproksimasi. Sakalipun demikian aproksimasi yang sangat baik dapat diperoleh

karena sistem yang dipelajari cukup mendekati keadaan setimbang (*equilibrium*), atau skala waktu dalam sistem sedemikian pendek dibandingkan dengan waktu dari lingkungan.

Suatu sistem adalah dinamis apabila keadaannya berubah dengan waktu seperti pertumbuhan tanaman selama siklus hidupnya. Ini dapat bersifat kontinu apabila tabiat dan keadaannya berubah relatif perlahan, atau diskret apabila perubahannya terjadi cepat atau besar mis. pergantian penggunaan traktor. Kemudian suatu model adalah dinamis jika itu mensimulasi tabiat sistem yang dinamis. Model dinamis dicirikan oleh waktu sebagai salah satu faktor penentu perubahan dari sistem yang sering dinyatakan dalam persamaan diferensial pada kebanyakan model dinamik seperti berikut.

$$\frac{\delta y}{\delta t} = f \quad (10)$$

dimana y = suatu sifat (atribut) dari sistem seperti biomassa tanaman, t = peubah atau faktor waktu, dan f adalah fungsi. Persamaan differensial harus diintegrasikan dalam penggunaannya dalam model untuk mendapatkan tingkah-laku sesungguhnya dari sistem dengan waktu. Integrasi ini dapat dilakukan secara analitik yang menghasilkan suatu persamaan normal, tetapi sering hanya integrasi numeris yang dapat dilakukan dan biasanya dikerjakan langsung dalam komputer.

3.5 Model Deterministik dan Stokastik

Model deterministik adalah yang menghasilkan penaksiran kuantitas defenitif seperti hasil tanaman yang tidak disertai dengan informasi mengenai peluang. Ini dapat berlaku untuk kasus tertentu, tapi kurang memuaskan untuk kuantitas yang sangat bervariasi seperti curah hujan. Sebaliknya model stokastik mengandung unsur acak atau distribusi peluang, sehingga tidak hanya membuat penaksiran keluaran yang defenitif tapi juga disertai dengan deviasi (*variance*).

Semakin besar ketidak-pastian akan tingkah-laku suatu sistem, semakin penting penerapan model stokastik. Proses seperti kelahiran, migrasi, kematian, dan konversi kimia cenderung terjadi secara acak. Tingkah-laku sistem dapat menjadi deterministik apabila kuantitas besar dilibatkan, artinya variasi yang sangat kecil tidak begitu berarti dalam taksiran yang dihasilkan model. Kasus epidemiologi, dinamika populasi, pengendalian populasi kadang-kadang didekati dengan model stokastik.

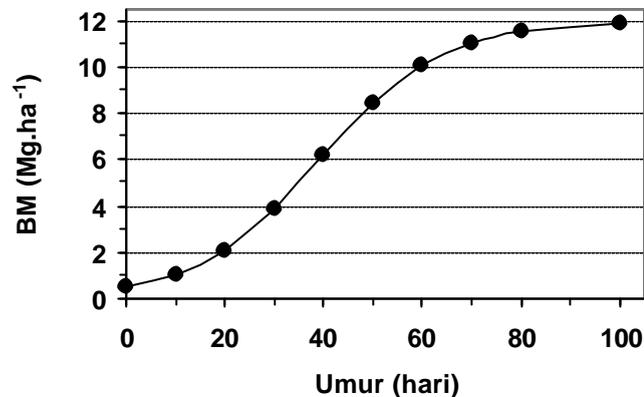
3.6 Model deskriptif

Model tanaman dalam penggunaannya dapat dibagi kepada dua bagian yaitu model deskriptif dan model eksplanatori. Suatu model deskriptif membatasi tingkah-laku atau tabiat suatu sistem dalam suatu cara sederhana, dan mengandung sedikit, jika ada, mekanisme yang menyebabkan tingkah-laku tersebut. Pembentukan dan penggunaan model agak bersifat langsung dan sering terdiri dari satu atau lebih persamaan matematik. Suatu contoh persamaan demikian adalah yang diturunkan dari hasil pengamatan biomassa tanaman dengan waktu (Gambar 9) yang dapat digambarkan dengan persamaan berikut.

$$BM = \frac{12,0}{1,0 + 23,0 \cdot e^{-0,08T}} \quad (11)$$

dimana BM = biomassa tanaman (t/ha), $12,0$ = harga BM maksimum, T = waktu (hari) dari mulai muncul dan $1,0$, $23,0$ & $0,08$ = konstanta (parameter). Persamaan ini hanya

menggambarkan perkembangan biomassa tanaman dengan waktu, dan dapat bermanfaat untuk menentukan secara cepat biomassa tanaman pada waktu tertentu jika tidak ada perlakuan atau pengamatan lain.



Gambar 9. Pola perkembangan biomassa tanaman jagung dengan umur yang digambarkan dengan model deskriptif (Penning dan Vries *et al.*, 1989).

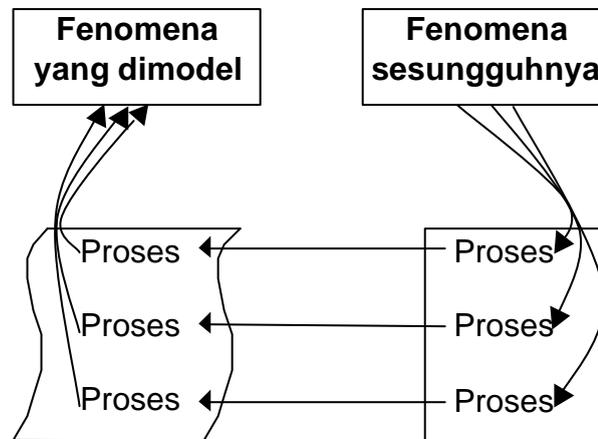
Akan tetapi laju pertumbuhan tanaman tidak akan sama apabila keadaan tanah, pemeliharaan tanaman dan iklim berbeda. Perbedaan iklim saja dapat menghasilkan perbedaan pertumbuhan yang besar. Agar persamaan dapat meliputi keadaan yang berbeda misalnya pertumbuhan tanaman pada musim tanam yang berbeda, titik awal dan maksimum dapat diadaptasikan. Tetapi penaksiran parameter demikian terlalu tidak tepat untuk studi produksi tanaman tertentu pada lahan dan musim tanam yang berbeda. Secara teori, konstanta dan persamaan yang dibutuhkan dapat dihasilkan dengan pelaksanaan banyak percobaan sesuai dengan variasi lingkungan yang ingin diliput dengan tingkat akurasi yang dapat diterima. Tetapi sesungguhnya, pola pertumbuhan merupakan integrasi pengaruh dari banyak peubah yang sebagian bersifat konstan, seperti tekstur tanah, sedang yang lain seperti varietas dengan sifat-sifatnya dan pemeliharaan tanaman dapat terus berubah. Jadi kuantifikasi semua peubah dengan cukup baik hampir tidak mungkin dengan pelaksanaan percobaan yang banyak. Karena itu model deskriptif bermanfaat hanya untuk keadaan dimana interpolasi (penyisipan) diantara observasi dicari dan tidak ada usaha untuk mempelajari hal yang mendasari bentuk liku biomassa.

3.7 Model Eksplanatori

Suatu model eksplanatori terdiri dari deskripsi kuantitatif dari mekanisme dan proses yang menyebabkan tingkah-laku suatu sistem. Deskripsi ini merupakan pernyataan eksplisit (tegas) dari teori ilmiah dan hipotesis. Untuk menciptakan suatu model eksplanatori, suatu sistem dianalisis dan proses serta mekanismenya dikuantifikasi secara terpisah. Model dibangun dengan mengintegrasikan keseluruhan deskripsi dari sistem tersebut. Dalam pertumbuhan tanaman, model eksplanatori mengandung deskripsi berbagai proses seperti fotosintesis, perluasan daun dan pembentukan anakan.

Jadi pertumbuhan merupakan integrasi atau resultante dari berbagai proses yang mendukungnya (Gambar 10). Pengaruh faktor lingkungan terhadap setiap proses harus dikuantifikasi seperti radiasi dan suhu. Status tanaman harus dipertimbangkan termasuk antara lain luas daun, fase perkembangan dan kandungan nitrogen. Laju pertumbuhan kemudian dihitung untuk setiap fase dari masa pertumbuhan yang tergantung pada status

tanaman aktual, tanah dan iklim yang berlaku. Semua faktor penting dapat dijelaskan dengan cara ini asalkan ada cukup teori dan data untuk itu. Laju pertumbuhan pada suatu fase dapat dijelaskan dari segi proses fisiologi, fisika dan kimia serta pengaruh faktor lingkungan.



Gambar 10. Bagan yang menunjukkan bagaimana obseervasi dunia nyata dianalisis dan diintegrasikan ke dalam model eksplanatori untuk meniru (simulasi) tabiat sistem (diangkat dari Penning de Vries *et al.*, 1989)

Dalam simulasi model eksplanatori dari sistem dinamis, laju perubahan dapat ditaksir cukup dekat dengan membuat laju proses konstan dalam jangka waktu yang pendek, dan ini dikenal sebagai pendekatan peubah keadaan. Interval waktu yang cukup ideal dalam simulasi tanaman adalah satu hari, dan biomassa yang dibentuk dalam jangka waktu tersebut adalah perkalian laju pertumbuhan dengan waktu. Ini ditambahkan ke biomassa sebelumnya, dan laju pertumbuhan berikutnya dihitung yang dapat berbeda akibat perbedaan dari faktor lingkungan dan keadaan tanaman. Jumlah proses yang sangat penting dalam simulasi pertumbuhan tanaman relatif terbatas, dan kuantifikasi proses tersebut secara rinci tidak perlu. Misalnya, perhitungan efisiensi sintesis setiap senyawa biokimia dalam biomassa biasanya tidak perlu, dan rata-rata dari setiap kelompok biasanya cukup. Aspek dinamis dari fisiologi sel dalam model pertumbuhan tanaman juga dianggap tidak perlu. Model eksplanatori dapat bermanfaat dari segi praktis sekalipun pengetahuan tentang proses tidak mencapai tingkat sel. Suatu hal yang perlu diingat adalah bahwa semakin rinci yang diinginkan dari model, semakin rinci yang harus dikandung model tersebut dan semakin banyak proses eksplanatori yang harus dilibatkan.

Perkembangan model eksplanatori dalam beberapa dekade belakangan ini relatif lambat karena antara lain beberapa topik esensial tidak cukup difahami. Sekalipun model tersebut kaya informasi, tetapi susah dipakai (*unwieldy*). Penggunaanya sering hanya untuk menguji kembali hipotesis dan acuan dalam perbandingan model. Model tersebut jarang digunakan kecuali oleh ilmuan pembuatnya. Model eksplanatori, yang dapat dibagi menjadi tiga bentuk (preliminari, komphrehensif dan iktisar) berkembang secara perlahan. Model preliminari mempunyai struktur yang sederhana karena pemahaman pada tingkat eksplanatori masih samar. Model komphrehensif mewakili suatu sistem dengan unsur esensial difahami secara seksama dan banyak pengetahuan ini disatukan. Model iktisar merupakan abstraksi dari model komphrehensif, dan banyak digunakan belakangan ini dimana musim atau lengas tanah membatasi hasil.

4. Klasifikasi Sistem Produksi

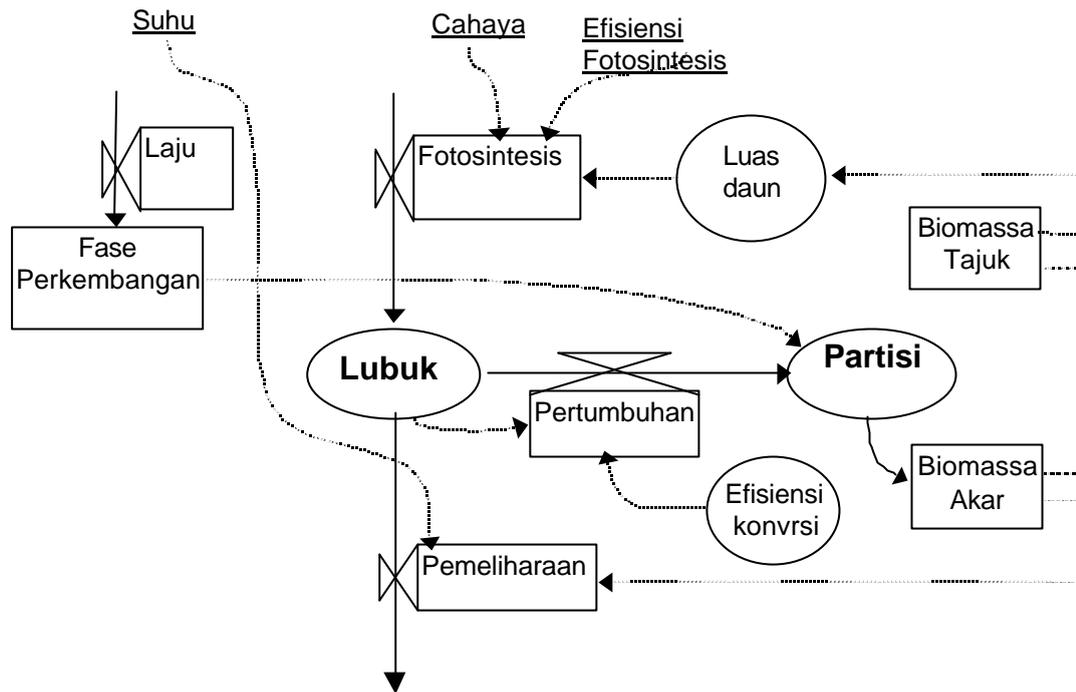
Klasifikasi sistem produksi tanaman yang dibuat oleh de Wit (Penning de Vries dan Van Laar, 1982) perlu disimak sebagai bahan pertimbangan dalam pengembangan tipe atau tingkat model. Seseorang tentu bebas untuk mengembangkan model yang dikendaki sesuai dengan tujuannya. Tetapi pada tahap awal, ada baiknya perhatian difokuskan pada model sederhana seperti model Produksi Tingkat 1 untuk menghindari masalah yang kompleks dalam proses pembentukan model. Jika model demikian sudah berhasil dikembangkan, maka ini akan sangat banyak membantu dalam pengembangan model yang lebih kompleks seperti yang digunakan untuk Produksi Tingkat berikutnya karena sebagian model dapat digunakan secara langsung.

4.1 Produksi Tingkat 1

Tanaman dalam hal ini memperoleh air dan unsur hara yang cukup sehingga tidak menjadi faktor pembatas. Karena itu, tanaman memberikan hasil yang paling tinggi diantara tingkat produksi yang lain. Pertumbuhan dan hasil tanaman hanya ditentukan oleh keadaan tanaman itu sendiri, faktor iklim khususnya radiasi matahari dan suhu. Laju pertumbuhan dengan tajuk tanaman yang penuh berkisar antara 150-350 kg.ha⁻¹ berat kering. Ini merupakan laju pertumbuhan potensil yang memberikan **hasil potensial**. Laju pertumbuhan tanaman yang dikendalikan oleh energi radiasi yang tersedia untuk proses fotosintesis tergantung pada tingkat radiasi yang datang dan sifat tanaman yang berhubungan dengan intersepsi cahaya. Model yang menggambarkan sistem tanaman demikian disajikan pada Gambar 11.

Karbohidrat yang dihasilkan, yang biasanya dinyatakan dalam glukosa untuk kemudahannya, digunakan untuk mensintesis bahan struktural tanaman (biomasa), dengan efisiensi konversi tertentu. Substrat karbohidrat juga digunakan sebagai sumber energi metabolisme yang dibutuhkan untuk proses sintesis senyawa-senyawa penyusun biomassa tanaman dan pemeliharaan tubuh tanaman yang sudah ada. Hasil fotosintesis dapat disimpan sementara dalam bentuk yang mudah digunakan seperti pati (sebagai cadangan) sebelum digunakan untuk pertumbuhan dan pemeliharaan. Bagian struktural tidak dapat dimobilisasi untuk keperluan pertumbuhan dan pemeliharaan.

Faktor lingkungan lain yang mempengaruhi laju fotosintesis dan pertumbuhan adalah suhu. Pembagian (partisi) karbohidrat untuk biomassa daun, batang, akar dan organ penyimpan berhubungan erat dengan umur fisiologis tanaman yang merupakan suatu fungsi dari suhu.

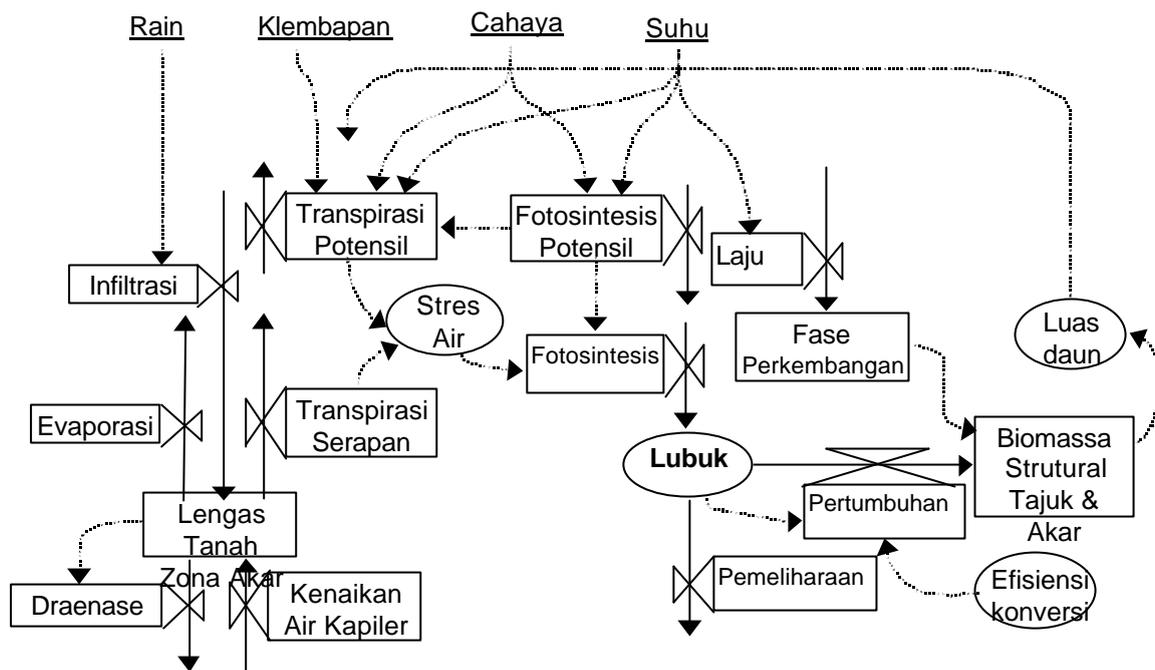


Gambar 11. Bagan diagram alir dari suatu sistem pada Produksi Tingkat 1. Cahaya dan suhu = peubah penggerak; efisiensi fotosintesis = konstanta. Empat persegi menunjukkan kuantitas (peubah keadaan); simbol kran = aliran (peubah laju); lonjong = peubah tambahan; peubah dengan garis bawah = peubah penggerak dan luar lain; garis utuh = aliran bahan; garis putus-putus = aliran informasi (simbol menurut Forester, 1961) (diangkat dari Penning de Vriest *et al.*, 1989)

4.2 Produksi Tingkat 2

Laju pertumbuhan tanaman dalam hal ini dibatasi oleh ketersediaan air selama pertumbuhan tanaman atau paling sedikit selama jangka waktu tertentu. Keadaan demikian dapat terjadi pada lahan kering, yang tergantung pada air hujan untuk kebutuhan air tanaman, jika tanaman memperoleh unsur hara yang cukup, misalnya dengan pemupukan. Tetapi air merupakan media transpor unsur hara, sehingga kekurangan air yang tanpa diikuti oleh kekurangan unsur hara mungkin bukan hal yang umum. Kejadian umum yang paling mungkin adalah laju pertumbuhan yang dibatasi oleh unsur hara, tapi tidak oleh air. Bagan diagram alir dari model yang menunjukkan pengaruh kekurangan air terhadap laju pertumbuhan tanaman disajikan pada Gambar 12.

Pengaruh kekurangan air diwujudkan melalui proses fisiologis yaitu penutupan stomata akibat tekanan turgor sel penyangga yang menurun. Keadaan ini selanjutnya akan mengakibatkan penurunan difusi dan reduksi CO_2 serta transpirasi. Efisiensi penggunaan air dapat dibatasi sebagai nisbah diantara fotosintesis dengan transpirasi. Nisbah diantara laju transpirasi aktual dengan potensial dapat memberikan gambaran keseimbangan karbon dan air. Tingkat transpirasi dan karenanya fotosintesis potensial disadari tergantung pada ketersediaan air. Jumlah air yang disimpan dalam tanah dalam daerah perakaran merupakan suatu penyangga antara air hujan, air kapiler yang naik dan proses yang mengakibatkan air hilang. Kapasitas penyangga dan kehilangan air, melalui transpirasi dan proses non-produktif, secara bersamaan membuat pertumbuhan tergantung secara tidak langsung hanya pada air hujan. Hubungan diantara pertumbuhan tanaman dengan peubah penggerak utama dalam sistem ini tidak bersifat langsung, berbeda dengan Produksi Tingkat 1 yang bersifat langsung.

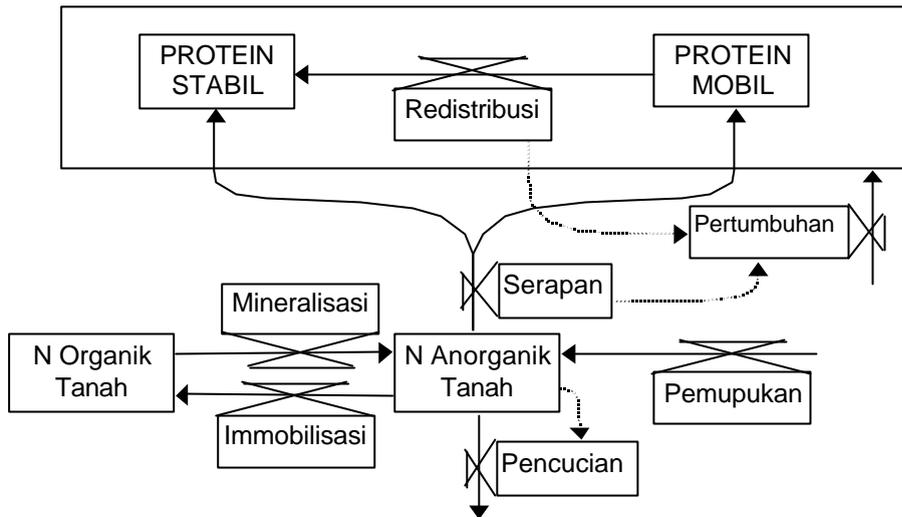


Gambar 12. Bagan diagram alir dari suatu sistem pada Produksi Tingkat 2 dengan kekurangan air sebagai faktor pembatas utama (diangkat dari Penning de Vriest *et al.*, 1989). Simbol (lihat Gambar 10)

4.3 Produksi Tingkat 3

Pertumbuhan tanaman dibatasi oleh kekurangan nitrogen (N) paling sedikit selama masa pertumbuhan tertentu dan oleh kekurangan air atau keadaan musim yang kurang menguntungkan pada masa pertumbuhan yang lain. Hal demikian sangat umum terjadi pada lahan pertanian yang diusahakan secara intensif. Ini dicirikan oleh adanya pemupukan N yang tinggi untuk mendapatkan pertumbuhan yang baik dan hasil yang tinggi. Bagan diagram alir yang menunjukkan laju pertumbuhan yang dikendalikan oleh ketersediaan N dari tanah dan cadangan N dalam tubuh tanaman disajikan pada Gambar 13.

Dalam jaringan tanaman, N dibagi dua bagian yaitu yang dapat dan tidak dapat dimobilisasi. Jumlah N yang dapat dimobilisasi untuk pertumbuhan bagian baru tanaman sering cukup banyak, dan bagian yang dapat dimobilisasi adalah enzim dan protein membran yang terurai dan ditranspor dalam bentuk asam amino. Tetapi tidak semua N dalam jaringan tanaman dapat dianggap sebagai cadangan N, karena sel tidak dapat berfungsi tanpa protein. Kandungan N dalam jaringan tua dapat berkurang hingga tinggal setengah atau seperempat dari tingkat maksimum. Pertumbuhan tanaman berhubungan erat dengan tingkat serapan N setelah cadangan N dalam tubuh tanaman digunakan, atau pertumbuhan tidak tergantung pada serapan N jika cadangan N tersedia. Karena itu hubungan diantara pertumbuhan dengan serapan N berbeda dari yang dengan serapan air.

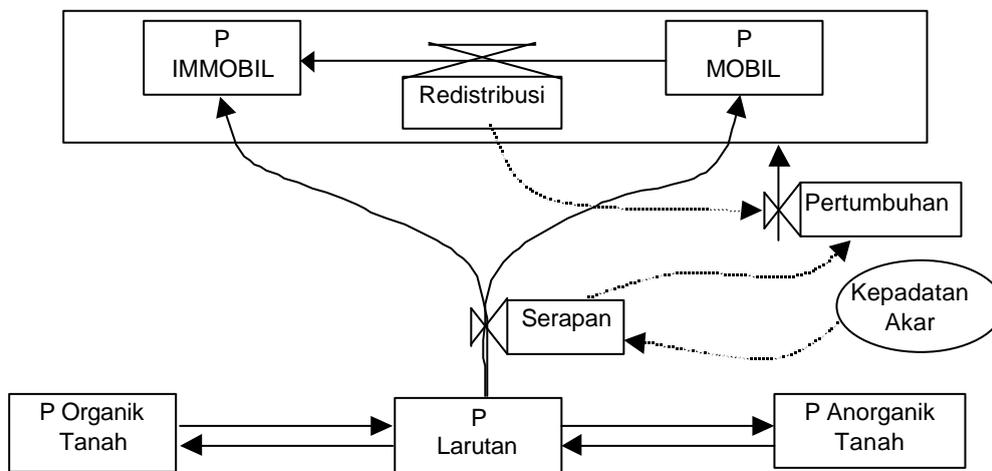


Gambar 13. Bagan diagram alir dari suatu sistem pada Produksi Tingkat 3 dengan kekurangan nitrogen sebagai faktor pembatas utama (diangkat dari Penning de Vriest *et al.*, 1989). Simbol (lihat Gambar 10)

4.4 Produksi Tingkat 4

Pertumbuhan tanaman dibatasi oleh forfor (P) dan unsur hara lain dalam tanah paling sedikit selama masa pertumbuhan tertentu. Laju pertumbuhan sekitar 10-50 kg ha⁻¹ dengan masa pertumbuhan yang kurang dari 100 hari. Keadaan demikian di-pertimbangkan umum terjadi pada lahan yang sudah tereksploitasi dan pemupukan tidak dilakukan. Bagan diagram alir untuk pada Produksi Tingkat 4, dengan proses utama yang sama dengan yang pada Produksi Tingkat 3, disajikan pada Gambar 14.

Tanaman mengandung cangan P, dan penurunan konsentrasi P dalam jaringan tua berkurang sama dengan yang pada N. Tetapi proses yang membuat P dalam tanah tersedia diserap akar berbeda dengan yang pada N. Untuk serapan P, tanaman membutuhkan kepadatan perakaran yang lebih tinggi dari pada untuk serapan N agar tanaman memperoleh jumlah P yang cukup. Jumlah P, yang biasanya tersedia dalam jumlah terbatas dalam larutan tanah, lebih ditentukan oleh laju pertukarannya.



Gambar 14. Bagan diagram alir dari suatu sistem pada Produktif Tingkat 4 dengan kekurangan fosfor sebagai faktor pembatas utama (diangkat dari Penning de Vriest *et al.*, 1989). Simbol (lihat Gambar 10)

Apabila pengertian dan contoh model yang diuraikan diatas dicermati, maka seseorang dapat sampai pada kesimpulan bahwa **model** sebenarnya dapat diartikan dengan **konsep**. Karena itu, model dari suatu sistem dapat beragam sekalipun dengan tujuan yang sama karena perbedaan dalam konsep. Sebagai contoh, de Wit mengembangkan model tanaman yang dibagi pada empat tingkatan yang dapat berbeda dari model yang dikembangkan oleh orang lain. Model selanjutnya dapat diwujudkan dalam bentuk pernyataan (kalimat), gambar atau persamaan matematis. Upaya ini tidak lebih dari untuk mengenal secara seksama dan mempelajari dunia nyata atau bagian dari dunia nyata (sistem).

Bahan Bacaan

- Blad, B.L., 1983. Atmospheric Demand for Water. In "Crop-Water Relations", I.D. Teare & M.M. Peet (eds). John Wiley & Sons, New York. pp.1-44
- De Wit *et al.*, 1978. Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen
- Forester, J.W., 1961. Industrial dynamics. John Wiley & Sons, New York. Senge, P., 1990. The fifth discipline. New York: Doubleday currency
- Hawking, S., 1993. A brief history of time: From big bang to black holes. Bantam Books, Toronto.
- Jones, J.W., Mishoe, J.W. and Boote, K.J., 1987. Introduction to simulation modeling. FFTC, TB No. 100
- Penning de Vries, F.W.T, Jansen, D.M., ten Berge, H.F.M. and Bakema, A., 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. IRRI, Los Banos & Pudoc, Wageningen.
- Penning de Vries, F.W.T. and van Laar, H.H., 1982. Simulation of plant growth and crop production. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen
- Penning de Vries, F., Teng, P. and Metselaar, K., 1993. Systems approaches for agricultural development. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, The Netherlands.
- Senge, P., 1990. The fifth discipline. New York: Doubleday currency