

Pemanfaatan Teori Graf, Pohon, dan Kombinatorial dalam Perhitungan Peluang Suatu Gen Penyebab Kelainan Genetik Diturunkan

Agil Fadillah Sabri - 13522006¹
Program Studi Teknik Informatika
Sekolah Teknik Elektro dan Informatika
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10 Bandung 40132, Indonesia
¹13522006@std.stei.itb.ac.id

Abstract—Kelainan genetik merupakan tantangan kompleks dalam dunia medis dan genetika, yang memerlukan pendekatan analisis yang canggih untuk memahami dan mengatasi kompleksitas pewarisan genetik. Makalah ini mengeksplorasi pemanfaatan teori graf, pohon, dan pendekatan kombinatorial dalam konteks perhitungan pewarisan gen penyebab kelainan genetik. Teori graf dan pohon memberikan landasan representasi visual yang kuat untuk model interaksi gen dan gambaran pola pewarisan gen dalam keluarga. Analisis kombinatorial, di sisi lain, memberikan kerangka matematis untuk menghitung berbagai cara pewarisan gen. Dalam makalah ini, akan dibahas bagaimana konsep-konsep ini dapat diterapkan untuk menyelidiki peluang suatu gen penyebab kelainan genetik diwariskan pada suatu generasi.

Kata Kunci—Graf, Kelainan Genetik, Kombinatorial, Pohon.

I. PENDAHULUAN

Kelainan genetik merupakan aspek penting dalam studi genetika, yang mempengaruhi kesehatan dan perkembangan makhluk hidup, termasuk manusia. Pewarisan gen penyebab kelainan genetik menjadi fokus utama dalam upaya pemahaman dan penanganan kondisi genetik yang kompleks. Dalam era kemajuan teknologi informasi dan bioteknologi, pemanfaatan konsep teori graf, pohon, dan kombinatorial muncul sebagai pendekatan yang inovatif dan efisien dalam menganalisis informasi genetik.

Pendekatan teori graf dan pohon, menjadi alat yang efektif untuk merepresentasikan pewarisan gen dalam keluarga atau populasi. Penggunaan pohon dapat memberikan gambaran yang jelas tentang bagaimana suatu gen dapat diwariskan pada suatu generasi dan bagaimana pola penyebaran gen penyebab kelainan genetik dalam suatu keturunan.

Sementara itu, pendekatan kombinatorial menawarkan kerangka kerja matematis untuk menghitung jumlah dan cara-cara berbeda di mana gen dapat diatur dan diwariskan. Analisis kombinatorial dapat membantu mengidentifikasi pola-pola dalam distribusi genetik, memberikan wawasan tentang kerentanan individu terhadap kelainan genetik, dan memungkinkan pengembangan strategi pencegahan yang lebih tepat.

Makalah ini akan membahas pemanfaatan teori graf, pohon, dan pendekatan kombinatorial dalam perhitungan peluang pewarisan gen penyebab kelainan genetik. Melalui penelusuran konsep-konsep ini, diharapkan dapat memperdalam pemahaman tentang mekanisme pewarisan genetik.

II. LANDASAN TEORI

A. Graf (Graph)

a. Definisi Graf

Dalam ilmu matematika diskrit dan ilmu komputer, graf didefinisikan sebagai sebuah tuple/pasangan dua elemen yang digunakan untuk merepresentasikan objek-objek diskrit dan hubungan antar objek di dalamnya. Elemen pertama di dalam graf merupakan himpunan simpul (vertex), sedangkan elemen kedua di dalam graf merupakan himpunan sisi (edge). Secara matematis, graf dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$G = (V, E)$$

keterangan:

G = graf.

V = himpunan tidak kosong dari simpul-simpul (*vertices*).

E = himpunan (boleh kosong) sisi-sisi (*edges*) yang menghubungkan sepasang simpul.

b. Jenis-Jenis Graf

Berdasarkan ada atau tidak adanya sisi ganda (yaitu dua/lebih sisi yang menghubungkan dua simpul yang sama) atau sisi gelang (yaitu sisi yang berawal dan berakhir pada simpul yang sama), sebuah graf dapat digolongkan menjadi dua jenis:

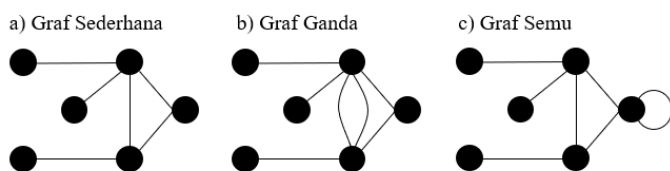
1. Graf Sederhana (*simple graph*)

Graf sederhana merupakan sebuah graf yang tidak mengandung sisi ganda maupun sisi gelang.

2. Graf Tak-Sederhana (*unsimple graph*)

Terbagi menjadi dua, yaitu:

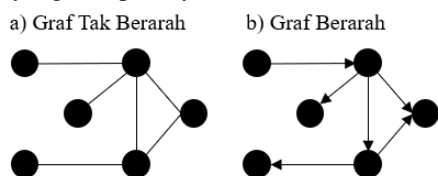
- Graf Ganda (*multigraph*), yaitu graf yang mengandung sisi ganda.
- Graf Semu (*pseudograph*), yaitu graf yang mengandung sisi gelang.



Gambar 1. Jenis-Jenis Graf Berdasarkan Keberadaan Sisi Ganda dan Sisi Gelang
Sumber: Koleksi Pribadi

Berdasarkan orientasi sisi pada suatu graf, sebuah graf dapat digolongkan menjadi dua jenis:

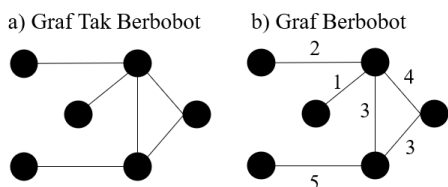
1. Graf Tak Berarah (*undirected graph*)
Graf yang sisi-sisinya tidak mempunyai orientasi arah.
2. Graf Berarah (*directed graph*)
Graf yang setiap sisinya memiliki orientasi arah.



Gambar 2. Jenis-Jenis Graf Berdasarkan Orientasi Sisi
Sumber: Koleksi Pribadi

Berdasarkan ada atau tidak adanya nilai pada sisi sebuah graf, sebuah graf dapat digolongkan menjadi dua jenis:

3. Graf Tak Berbobot (*unweighted graph*)
Graf yang sisi-sisinya tidak memiliki nilai (*value*).
4. Graf Berbobot (*weighted graph*)
Graf yang setiap sisinya memiliki nilai (*value*) tertentu.



Gambar 3. Jenis-Jenis Graf Berdasarkan Bobot pada Sisinya
Sumber: Koleksi Pribadi

c. Istilah-Istilah dalam Teori Graf

Berikut adalah beberapa istilah-istilah penting yang ada dalam teori graf, yaitu:

1. Ketetanggaan (*adjacent*), dua buah simpul dikatakan bertetangga jika keduanya terhubung secara langsung.
2. Bersisian (*incidency*), sebuah simpul dikatakan bersisian dengan sebuah sisi jika simpul tersebut terhubung secara langsung dengan sisi tersebut (sisi tersebut berasal atau berakhir pada simpul tersebut).
3. Simpul Terpencil (*isolated vertex*), yaitu sebuah simpul yang tidak memiliki sisi yang bersisian dengannya.
4. Graf Kosong (*null graph* atau *empty graph*), yaitu graf yang himpunan sisinya merupakan himpunan kosong.
5. Derajat (*degree*), menyatakan jumlah sisi yang bersisian dengan suatu simpul.
6. Lintasan (*path*), yaitu barisan sisi yang terhingga ataupun tak terhingga yang menghubungkan suatu barisan simpul.

7. Sirkuit (*circuit*), merupakan lintasan yang berawal dan berakhir pada simpul yang sama.
8. Keterhubungan (*connected*), merupakan kondisi ketika dua buah simpul memiliki lintasan yang menghubungkan keduanya.
9. Upagraf (*subgraf*), merupakan graf lain yang memenuhi, misalkan $G = (V, E)$ adalah sebuah graf, $G_1 = (V_1, E_1)$ adalah upagraf (*subgraph*) dari G jika $V_1 \subseteq V$ dan $E_1 \subseteq E$.
10. Komplemen Upagraf, (misal komplemen dari upagraf G_1 terhadap graf G) adalah graf lain, misal $G_2 = (V_2, E_2)$ sedemikian sehingga $E_2 = E - E_1$ dan V_2 adalah himpunan simpul yang anggota-anggota E_2 bersisian dengannya.
11. Upagraf Merentang (*Spanning Subgraph*), yaitu sebuah upagraf yang mengandung semua simpul dari graf awal.
12. *Cut-Set*, adalah himpunan sisi yang bila dihapus dari sebuah graf menyebabkan graf tersebut tidak terhubung.

B. Pohon (*Tree*)

a. Definisi Pohon

Dalam ilmu matematika diskrit dan ilmu komputer, pohon merupakan sebuah bentuk khusus dari graf tak-berarah terhubung yang tidak mengandung sirkuit. Dalam pohon, dua simpul selalu dihubungkan dengan tepat 1 lintasan. Beberapa pohon yang saling lepas membentuk apa yang disebut dengan hutan (*forest*).

Sebuah pohon dapat dibentuk dari sebuah graf dengan menghilangkan beberapa sisi/simpul sehingga tidak lagi mengandung sirkuit. Jika semua simpul pada sebuah graf dimasukkan dalam pembentukan sebuah pohon, pohon yang terbentuk disebut dengan pohon merentang (*spanning tree*). Pohon merentang dari sebuah graf terhubung adalah upagraf merentang yang berupa pohon. Pohon merentang dari graf G diperoleh dengan memutus sirkuit di dalam graf.

Pohon dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu:

1. Pohon bebas (*free tree*), yaitu pohon yang setiap simpulnya tidak diperlakukan secara berbeda.
2. Pohon berakar (*rooted tree*), yaitu pohon yang satu buah simpulnya diperlakukan khusus sebagai akar dan setiap sisi pada pohon diberi arah menjauh dari simpul akar tersebut.

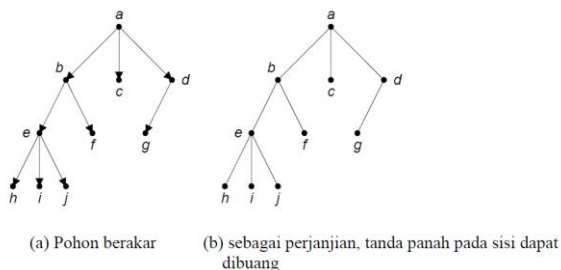
b. Pohon Berakar (*Rooted Tree*)

Pohon yang satu buah simpulnya diperlakukan sebagai akar dan sisi-sisinya diberi arah sehingga menjadi graf berarah dinamakan pohon berakar (*rooted tree*). Setiap simpul pada pohon berakar, dapat dicapai dari akar dengan mengikuti arah pada sisi-sisi yang menghubungkannya.

Dalam pohon berakar, simpul akar merupakan sebuah simpul yang tidak memiliki derajat masuk. Sedangkan simpul-simpul yang tidak memiliki derajat keluar disebut dengan simpul daun. Adapun simpul-simpul yang mempunyai derajat keluar maupun derajat masuk disebut dengan simpul cabang.

Sebarang pohon bebas, dapat diubah menjadi pohon berakar dengan memilih sebuah simpul menjadi akar. Pemilihan simpul yang berbeda akan menghasilkan pohon berakar yang berbeda.

Sebagai konvensi (kesepakatan), karena pada pohon berakar semua sisi selalu mengarah menjauh dari akar, tanda panah dalam representasi geometri pohon berakar tidak perlu dituliskan.



Gambar 4. Pohon Berakar
Sumber: Slide Materi Kuliah

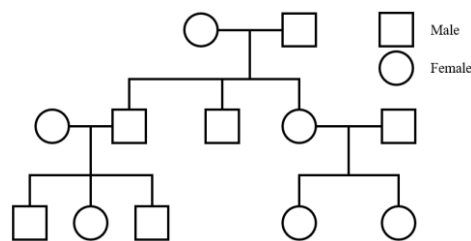
Adapun beberapa istilah penting dalam pohon berakar yaitu:

1. Anak (*child*) dan Orangtua (*parent*). Anak merupakan sebuah simpul yang terhubung dengan simpul lainnya dan berada tepat 1 tingkatan di bawahnya. Orangtua merupakan simpul yang memiliki simpul anak.
2. Lintasan (*path*), merupakan barisan sisi yang menghubungkan sebuah simpul dengan simpul lainnya dalam sebuah pohon.
3. Saudara Kandung (*sibling*), merupakan sekumpulan simpul yang memiliki simpul orangtua yang sama.
4. Upapohon (*subtree*), merupakan cabang dari pohon yang lebih besar beserta semua keturunannya.
5. Derajat (*degree*), merupakan jumlah simpul anak yang dimiliki oleh sebuah simpul. Derajat sebuah pohon ditentukan dari derajat maksimum dari simpul-simpul di dalam pohon tersebut. Untuk pohon dengan derajat maksimum n , disebut sebagai pohon n -ary dan setiap simpul di dalamnya hanya boleh memiliki anak paling banyak n .
6. Tingkat (*level*), merupakan jarak suatu simpul dari simpul akar, yang dihitung dari seberapa banyaknya sisi yang menghubungkan sebuah simpul dengan simpul akar.
7. Kedalaman (*depth*) atau Tinggi (*height*), merupakan tingkat maksimum dari sebuah pohon.

c. Pohon Keluarga (*Family Tree*)

Pohon keluarga atau disebut juga sebagai silsilah keluarga, adalah suatu bagan yang menampilkan hubungan keluarga (silsilah) dalam suatu struktur pohon. Salah satu format yang sering digunakan dalam menampilkan silsilah keluarga adalah pohon dengan generasi yang lebih tua di bagian atas dan generasi yang lebih muda di bagian bawah.

Berbeda dengan pohon berakar, pohon keluarga memiliki 2 simpul orang tua untuk setiap simpul anak, karena manusia terlahir dari pasangan ayah dan ibu. Namun, konsep pohon berakar masih tetap dapat dipakai di dalam pohon keluarga. Konsep-konsep seperti anak, orangtua, lintasan, saudara kandung, upapohon, derajat, tingkat, dan kedalaman masih bisa digunakan di dalam pohon keluarga.



Gambar 5. Pohon Keluarga
Sumber: Koleksi Pribadi

C. Kombinatorial

a. Definisi Kombinatorial

Kombinatorial adalah cabang matematika untuk menghitung (*counting*) jumlah penyusunan objek-objek berhingga tanpa harus mengenumerasi semua kemungkinan susunannya. Kombinatorial mempelajari tentang pengaturan objek-objek.

Terdapat dua kaidah dasar di dalam kombinatorial yang disebut dengan kaidah pencacahan, yaitu:

1. Kaidah Penjumlahan (*Rule of Sum*)

Digunakan ketika hendak menghitung jumlah total kemungkinan dari dua atau lebih kejadian atau kondisi yang setiap kondisinya tidak dapat terjadi secara bersamaan. Kaidah penjumlahan secara intuitif mengatakan bahwa, jika ada A buah cara untuk melakukan sesuatu dan B buah cara untuk melakukan hal lain, tetapi tidak dapat melakukan keduanya di saat yang sama, maka ada $A + B$ cara untuk memilih salah satu dari hal tersebut.

Secara matematis, jika ada n_1 cara untuk terjadinya kejadian 1, n_2 cara untuk terjadinya kejadian 2, ..., n_k cara untuk terjadinya kejadian k , dengan setiap kejadian tidak dapat terjadi secara bersamaan, maka banyaknya cara kejadian tersebut dapat terjadi adalah:

$$\sum_{i=1}^k n_i = n_1 + n_2 + \dots + n_k$$

2. Kaidah Perkalian (*Rule of Product*)

Digunakan ketika hendak menghitung jumlah total kemungkinan dari dua atau lebih kejadian atau kondisi yang setiap kondisinya terjadi secara bersamaan. Kaidah perkalian secara intuitif mengatakan bahwa jika ada A buah cara untuk melakukan sesuatu dan B buah cara untuk melakukan hal lain secara bersamaan, maka akan ada $A \times B$ cara untuk melakukan hal tersebut.

Secara matematis, jika ada n_1 cara untuk terjadinya kejadian 1, n_2 cara untuk terjadinya kejadian 2, ..., n_k cara untuk terjadinya kejadian k , dengan setiap kejadian terjadi secara bersamaan, maka banyaknya cara kejadian tersebut dapat terjadi adalah:

$$\prod_{i=1}^k n_i = n_1 \times n_2 \times \dots \times n_k$$

b. Permutasi

Permutasi adalah jumlah urutan berbeda dari pengaturan sejumlah objek. Permutasi juga dapat diartikan sebagai penataan ulang objek-objek ke dalam urutan yang dapat dibedakan. Setiap urutan unik ini disebut permutasi.

Permutasi merupakan bentuk khusus dari aturan perkalian. Dalam kaidah permutasi, urutan objek-objek di dalamnya penting, sebagai contoh abc tidak sama dengan acb , tidak sama dengan bac , dan seterusnya.

Misal terdapat n buah elemen berbeda dan r buah tempat, maka banyaknya cara menyusun n buah elemen tersebut ke dalam r tempat adalah (dengan $r \leq n$):

$$P_r^n = {}_n P_r = P(n, r) = \frac{n!}{(n-r)!}$$

Jika pada himpunan n objek terdapat unsur-unsur yang sama, misal $k_1, k_2, k_3, \dots, k_t$, dengan $k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_t \leq n$. Banyaknya permutasi dari n objek tersebut adalah:

$$P(n; k_1, k_2, k_3, \dots, k_t) = \frac{n!}{k_1! \times k_2! \times k_3! \times \dots \times k_t!}$$

c. Kombinasi

Kombinasi merupakan bentuk khusus dari permutasi. Jika pada permutasi urutan objek-objek di dalamnya penting, pada kombinasi urutan objek-objek di dalamnya diabaikan, sehingga dalam kombinasi, abc sama dengan acb , sama dengan bac , dan seterusnya.

Misal terdapat n buah elemen berbeda dan r buah tempat, maka banyaknya cara mengkombinasikan n buah elemen tersebut ke dalam r tempat adalah (dengan $r \leq n$):

$$C_r^n = {}_n C_r = C(n, r) = \frac{n!}{(n-r)! r!}$$

Misal terdapat n buah objek dan r buah tempat, dengan setiap tempat boleh diisi oleh lebih dari 1 objek atau tidak diisi sama sekali, maka banyaknya cara menyusun n buah elemen tersebut adalah:

$$C(n+r-1, r) = C(n+r-1, n-1)$$

Kombinasi di atas disebut dengan kombinasi dengan pengulangan.

d. Peluang Diskrit

Peluang suatu kejadian A dinotasikan sebagai $P(A)$. Peluang merupakan perbandingan antara titik sampel dengan kemungkinan seluruh kejadian. Sebuah peluang memiliki range $0 \leq P(A) \leq 1$. Jika dalam suatu percobaan dapat menghasilkan N macam hasil dan terdapat sebanyak n hasil dari N yang berkaitan dengan kejadian A , maka peluang kejadian A adalah:

$$P(A) = \frac{n}{N}$$

D. Genetika

a. Definisi Genetika

Genetika berasal dari Bahasa Latin “*genos*” yang berarti *suku bangsa* atau *asal-usul*, atau “*genno*” yang berarti *melahirkan*. Genetika merupakan cabang ilmu biologi yang mempelajari tentang pewarisan sifat pada makhluk hidup. Bidang kajian genetika dimulai dari wilayah subselular (molekular) hingga populasi. Secara lebih rinci, genetika berusaha menjelaskan mengenai material pembawa informasi (bahan genetik), bagaimana informasi itu diekspresikan (ekspresi genetik), dan bagaimana informasi itu dipindahkan dari satu individu ke individu yang lain (pewarisan genetik), serta mekanisme pewarisan informasi itu sendiri (meiosis, gametogenesis dan hukum Mendel).

b. Materi Genetik

Materi genetik atau faktor hereditas adalah informasi yang dimiliki setiap sel makhluk hidup yang dapat diwariskan kepada keturunannya.

1. Gen

Gen adalah substansi pembawa materi genetik yang diwariskan dari induk kepada keturunannya. Gen pada dasarnya merupakan asam nukleat, yaitu sebuah polimer yang tersusun atas nukleotida sebagai monomernya. Satu nukleotida tersusun atas tiga komponen, yaitu gugus fosfat, gula pentosa (ribosa atau deoksiribosa), dan basa nitrogen.

Basa nitrogen dapat dibedakan menjadi 5 jenis, yaitu *adenine/adenin* (A), *cytosine/sitosin* (C), *guanine/guanin* (G), *thymine/timin* (T), dan *uracil/urasil* (U). Adenin dan guanin digolongkan sebagai basa purin (struktur 2 cincin), sedangkan sitosin, timin, dan urasil digolongkan sebagai pirimidin (struktur 1 cincin). Setiap basa purin memiliki pasangan basa pirimidinnya. Adenin berpasangan dengan timin/urasil, sedangkan sitosin berpasangan dengan guanin. Kelima basa nitrogen inilah yang akan menjadi unit dasar dari kode genetik yang akan menentukan sifat-sifat pada makhluk hidup.

2. DNA dan RNA

DNA (*deoxyribonucleic acid*) dan RNA (*ribonucleic acid*) merupakan kumpulan gen-gen yang sangat panjang.

DNA merupakan makromolekul berupa benang sangat panjang yang terbentuk dari sejumlah besar deoksiribonukleotida, yang masing-masing tersusun dari satu basa, satu gula, dan satu gugus fosfat. Sesuai namanya, gula yang menyusun DNA berjenis gula deoksiribosa. Adapun basa nitrogen yang terdapat di dalam DNA ialah adenin yang berpasangan dengan timin, dan sitosin yang berpasangan dengan guanin. DNA merupakan pasangan dua rantai polinukleotida yang saling melilit membentuk heliks ganda. Kedua untai DNA ini menyimpan informasi biologis yang sama.

Adapun RNA mirip seperti DNA, yang juga merupakan makromolekul yang sangat panjang. Perbedaannya dengan DNA terletak pada jenis gula yang menyusunnya serta jenis basanya. RNA tersusun atas gula ribosa (alih-alih deoksiribosa). Selain itu, RNA tidak memiliki basa nitrogen timin, tetapi digantikan oleh urasil (sehingga adenin berpasangan dengan urasil). Perbedaan lainnya dengan DNA adalah RNA merupakan untai tunggal yang melilit terhadap dirinya sendiri membentuk heliks.

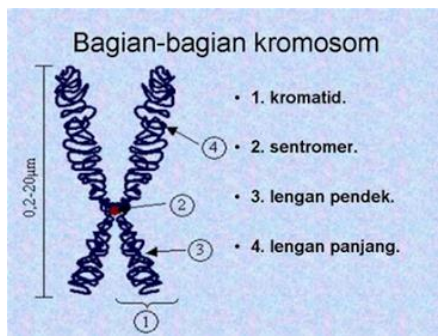
Baik DNA maupun RNA, keduanya sama-sama berperan penting dalam menyimpan informasi genetik pada makhluk hidup.

3. Kromosom

Kromosom merupakan bentuk terkondensasi (pemadatan) dari DNA. Pada kromosom, sebuah DNA akan melilit sebuah protein yang disebut dengan protein histon. Protein histon berfungsi mengikat dan memadatkan molekul DNA untuk mempertahankan integritasnya. Kromosom menampilkan struktur tiga dimensi yang kompleks, yang memainkan peran penting dalam pembelahan sel. Kromosom akan terlihat jelas saat sebuah sel akan melakukan pembelahan.

Kromosom memiliki struktur sebagai berikut:

- Kromatid, salah satu dari dua bagian identik pada kromosom.
- Sentromer, tempat dua kromatid bersentuhan.
- Lengan pendek.
- Lengan panjang.



Gambar 6. Struktur Kromosom

Sumber:

https://www.primalangga.com/2017/09/rangkuman-materi-genetik.html#google_vignette

Berdasarkan informasi genetik yang dibawanya, kromosom dibedakan menjadi dua, yaitu:

- Autosom, yaitu kromosom yang berperan dalam menentukan sifat-sifat non-kelamin pada suatu individu.
- Gonosom, yaitu kromosom yang berperan dalam menentukan sifat kelamin pada suatu individu

Setiap sel pada makhluk hidup mengandung kromosom yang berpasang-pasangan, kecuali pada sel gamet (sel telur dan sel sperma).

Setiap jenis makhluk hidup, memiliki jumlah kromosom yang berbeda. Manusia misalnya, memiliki 23 pasang kromosom (22 pasang autosom dan 1 pasang gonosom). Kucing memiliki 38 pasang kromosom, anjing memiliki 78 kromosom, dan lalat buah memiliki 8 pasang kromosom.

E. Hukum Pewarisan Mendel

a. Definisi Hukum Pewarisan Mendel

Hukum Pewarisan Mendel (*Mendel's Law of Inheritance*) merupakan hukum yang menjelaskan bagaimana sebuah sifat secara genetik diturunkan dari sebuah individu kepada keturunannya yang diusung oleh Gregor Mendel pada tahun 1865-1866.

Gregor Mendel merupakan seorang biarawan yang melakukan percobaan hibridisasi (persilangan) sederhana dengan tanaman kacang polong/kapri di kebunnya. Antara tahun 1856 dan 1863, Mendel membudidayakan dan menguji sekitar 5.000 tanaman kacang polong. Dari hasil percobaannya ini, ia kemudian menyimpulkan dua hukum yang kemudian dikenal sebagai Hukum Pewarisan Mendel. Hukum yang pertama disebut dengan Hukum Pemisahan, sedangkan hukum yang kedua disebut dengan Hukum Berpasangan secara Bebas.

b. Istilah-Istilah Penting dalam Hukum Pewarisan

Terdapat beberapa istilah penting yang harus diketahui agar dapat memahami hukum pewarisan sifat, yaitu:

1. Gen

Unit struktural terkecil yang bertanggung jawab untuk menentukan atau mempengaruhi sifat tertentu dalam suatu organisme.

2. Alel

Alel Adalah varian atau versi gen yang berbeda yang mengatur jenis sifat yang sama (seperti warna, bentuk tubuh, bentuk rambut, dll). Alel mewakili versi berbeda dari gen yang sama yang dapat menghasilkan variasi suatu sifat.

3. Genotipe

Genotipe mengacu pada kombinasi alel tertentu yang ada dalam DNA suatu individu. Ini mencakup semua alel yang diwarisi seseorang dari orang tuanya. Jika suatu organisme memiliki dua alel identik untuk gen tertentu, maka organisme tersebut disebut homozigot pada lokus genetik tersebut. Jika suatu organisme membawa dua alel berbeda untuk gen yang sama, maka organisme tersebut disebut heterozigot pada lokus gen tersebut.

4. Fenotipe

Merupakan sifat yang muncul atau karakteristik yang dapat diamati dari suatu individu, yang dihasilkan dari interaksi antara genotipe dan lingkungannya. Fenotipe dapat mencakup berbagai atribut fisik, fisiologis, dan perilaku.

5. Alel Dominan

Alel dominan merupakan alel yang menutupi ekspresi alel lain, sehingga sifat yang dibawanya akan terekspresikan pada turunannya. Jika pada suatu gen mengandung dua alel dominan untuk lokus gen yang sama, maka gen tersebut disebut gen homozigot dominan. Alel dominan pada umumnya disimbolkan dengan huruf kapital, misal A, B, C, dll.

6. Alel Resesif

Alel resesif merupakan alel yang terkalahkan (tertutupi) oleh gen lain (gen dominan) sehingga sifat yang dibawanya tidak terekspresikan pada keturunannya. Jika pada suatu gen mengandung dua alel resesif untuk lokus gen yang sama, maka gen tersebut disebut gen homozigot resesif. Alel resesif pada umumnya disimbolkan dengan huruf kecil, misal a, b, c, dll.

7. Pembawa (*Carrier*)

Pembawa adalah individu yang memiliki alel resesif untuk sifat tertentu tetapi tidak mengekspresikan fenotipe yang terkait. Pembawa biasanya heterozigot untuk sifat tersebut dan memiliki satu alel dominan dan satu alel resesif. Konsep ini umumnya dikaitkan dengan penyakit genetik. Pembawa dapat mewariskan alel resesif kepada keturunannya, yang berpotensi menghasilkan ekspresi sifat tersebut pada generasi mendatang.

c. Hukum Pertama Mendel

Hukum Pertama Mendel atau yang disebut juga dengan Hukum Pemisahan atau *Law of segregation*, menyatakan bahwa pada saat pembentukan gamet (sel kelamin anak), alel untuk setiap gen memisahkan diri satu sama lain sehingga tiap-tiap gamet hanya membawa satu alel dari setiap gen pada induknya. Hukum pertama ini menekankan pemisahan alel untuk satu sifat selama pembentukan gamet, memastikan setiap keturunan mewarisi satu alel dari setiap orang tua.

d. Hukum Kedua Mendel

Hukum Kedua Mendel atau disebut juga dengan Hukum Berpasangan secara Bebas atau *Law of Independent Assortment*, menyatakan bagaimana alel untuk sifat yang berbeda memisahkan dan bersatu secara independen satu sama lain

selama pembentukan gamet. Prinsip ini terkait erat dengan distribusi alel dari gen yang berbeda ke dalam gamet. Hukum kedua ini menggarisbawahi distribusi alel yang acak dan independen untuk sifat yang berbeda menjadi gamet, menghasilkan kombinasi sifat yang beragam pada keturunannya.

F. Kelainan Genetik pada Manusia

a. Definisi Kelainan Genetik

Kelainan genetik adalah masalah kesehatan yang disebabkan oleh satu atau lebih kelainan pada genom. Hal ini dapat disebabkan oleh mutasi pada gen tunggal (monogenik) atau beberapa gen (poligenik) atau oleh kelainan pada kromosom. Meskipun gangguan poligenik adalah yang paling umum, istilah ini banyak digunakan ketika membahas gangguan dengan penyebab genetik tunggal, baik dalam gen atau kromosom.

Berdasarkan pada letak suatu gen pada suatu kromosom serta sifat dominan-resesif sebuah gen, penyakit genetik dapat dibedakan menjadi 4 jenis, yaitu:

1. Gen Dominan terpaut pada Autosom
2. Gen Resesif terpaut pada Autosom
3. Gen Dominan terpaut pada Gonosom X
4. Gen Resesif terpaut pada Gonosom X
5. Gen terpaut pada Gonosom Y

b. Penyakit Keturunan yang terpaut Autosom

Dibedakan menjadi dua jenis, yaitu:

1. Gen Autosom Dominan (Dominan Autosomal)

Kelainan yang bersifat dominan autosomal merupakan kelainan yang disebabkan oleh gen-gen dominan yang berada pada autosom. Artinya, seorang individu dengan genotipe homozigot dominan dan heterozigot akan menderita suatu kelainan. Beberapa penyakit menurun yang tergolong dominan autosomal yaitu, polidaktili (kelebihan jari), sindaktili (jari menyatu), dan brakidaktili (jari pendek), kemampuan mengecap PTC, thalasemia (kekurangan hemoglobin), dan anonikia (tidak memiliki kuku).

2. Gen Autosom Resesif (Resesif Autosomal)

Kelainan yang bersifat resesif autosomal merupakan kelainan yang disebabkan oleh gen-gen resesif yang berada pada autosom. Oleh karena sifat resesifnya, kelainan ini hanya akan muncul jika suatu individu bersifat homozigot resesif. Beberapa contoh penyakit yang tergolong tipe ini adalah fenilketonuria (kekurangan enzim genilalanin), albino, dwarfisme (tubuh kerdil), *sickle cell* (sel darah merah yang berbentuk sabit).

c. Penyakit Keturunan yang terpaut Gonosom

Dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu:

1. Gen Gonosom-X Dominan (Dominan Gonosomal)

Kelainan ini disebabkan oleh gen-gen dominan yang terletak pada gonosom X.

Jika seorang pria penderita menikah dengan wanita normal (homozigot resesif), maka dapat dipastikan seluruh anak laki-lakinya terlahir normal, sedangkan seluruh anak perempuannya terlahir sebagai penderita.

Jika seorang pria penderita menikah dengan wanita penderita, maka anak laki-lakinya memiliki kemungkinan untuk terlahir normal (jika ibunya heterozigot) atau

menderita kelainan (jika ibunya heterozigot atau homozigot), sedangkan anak perempuannya terlahir sebagai penderita.

Jika seorang pria normal menikah dengan wanita penderita, maka baik anak laki-lakinya ataupun anak perempuannya sama-sama memiliki kemungkinan untuk mewarisi kelainan tersebut.

Beberapa contoh kelainan yang tergolong tipe ini adalah *rakithis hipofosfatemik*.

2. Gen Resesif-X Dominan (Resesif Gonosomal)

Kelainan ini disebabkan oleh gen-gen resesif yang terletak pada gonosom X.

Pada beberapa kasus ditemukan orang tua normal namun memiliki keturunan dengan suatu penyakit keturunan. Kondisi tersebut dapat terjadi ketika pihak ibu adalah seorang *carrier* (pembawa sifat).

Jika seorang pria normal menikah dengan seorang wanita *carrier*, maka anak laki-lakinya memiliki kemungkinan untuk mewarisi kelainan tersebut, sedangkan anak perempuannya memiliki kemungkinan untuk menjadi pembawa juga.

Jika seorang pria normal menikah dengan wanita penderita, maka anak laki-lakinya dijamin mewarisi penyakit tersebut, sedangkan anak perempuannya dijamin menjadi seorang pembawa.

Jika seorang pria penderita menikah dengan wanita normal, maka anak laki-lakinya akan lahir normal, sedangkan anak perempuannya akan menjadi seorang *carrier*.

Jika seorang pria penderita menikah dengan wanita penderita, maka setiap keturunannya dijamin pasti akan mewarisi kelainan tersebut.

Adapun beberapa contoh penyakit yang tergolong tipe ini adalah, hemofilia (darah sukar membeku), buta warna, anodontia dan amolar (gigi tidak lengkap), dll.

3. Gen Gonosom-Y

Kelainan ini disebabkan oleh gen-gen yang berada pada kromosom Y. Karena hanya laki-laki yang memiliki kromosom Y, maka kelainan ini hanya akan diderita laki-laki. Kesimpulannya, semua keturunan laki-laki dari ayah yang memiliki kelainan sifat yang terpaut kromosom Y akan mengalaminya juga. Beberapa contoh penyakit yang tergolong tipe ini adalah, *hekstekgrafior* (rambut landak), *webbed toes* (jari berselaput), hipertrikosis (rambut diseluruh tubuh).

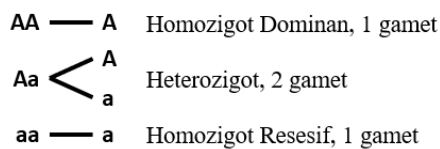
III. IMPLEMENTASI

A. Perhitungan Persentase Kemungkinan Gen Penyebab Kelainan Genetik Diturunkan dari Orang Tua ke Anak

a. Perhitungan Nilai Kemungkinan suatu Alel Diturunkan

Sebagian besar sifat yang ada pada manusia, termasuk kelainan genetik, dikodekan oleh 1 buah gen yang terdiri atas 2 alel. Berdasarkan Hukum Pertama Mendel, setiap alel ini akan berpisah ketika proses pembentukan gamet (sel telur/sel sperma). Selanjutnya, jika terjadi proses pembuahan oleh sel sperma pada sel telur, alel pada masing-masing sel gamet tersebut kemudian bersatu untuk mengkodekan 1 sifat yang dibawanya.

Jika dimisalkan suatu sifat dikodekan oleh suatu gen dengan alel yang disimbolkan dengan huruf A (alel dominan) dan a (alel resesif), maka ketika proses pembentukan gamet, kemungkinan gamet yang dapat terbentuk adalah:



Gambar 7. Kemungkinan Gamet yang Dapat Terbentuk
 Sumber: Koleksi Pribadi

Jika seseorang merupakan homozigot dominan, maka dapat dipastikan bahwa anaknya pasti setidaknya memiliki satu alel dominan. Begitu pula sebaliknya jika seseorang merupakan homozigot resesif. Adapun jika seseorang merupakan heterozigot, maka terdapat 0,5 kemungkinan bahwa anaknya akan mewarisi alel dominan darinya dan 0,5 kemungkinan bahwa anaknya akan mewarisi alel resesif.

Kita misalkan nilai kemungkinan ini sebagai P, maka nilai P untuk masing-masing alel adalah sebagai berikut:

Tipe	P_D (alel dominan)	P_R (alel resesif)
Homozigot Dominan	1	0
Homozigot Resesif	0	1
Heterozigot	0,5	0,5

Tabel 1. Nilai Peluang suatu Alel Diwariskan

keterangan:

P_D : peluang seorang anak mewarisi alel dominan.

P_R : peluang seorang anak mewarisi alel resesif.

b. Perhitungan Nilai Kemungkinan Seorang Mewarisi Gen Penyebab Kelainan Genetik Terpaut Autosom

Terdapat 2 alel pada satu buah gen di dalam tubuh manusia, dimana satu alel diperoleh dari ayah, dan satu alel diperoleh dari ibu, sehingga terdapat dua tempat yang akan diisi. Karena kedua alel ini harus ada disaat yang bersamaan, maka digunakanlah aturan perkalian (*rule of product*) untuk menghitung total kemungkinan alel yang akan diwarisi oleh suatu individu.

Berikut akan disajikan proses perhitungan nilai kemungkinan suatu alel diwarisi oleh seorang anak. Dalam proses perhitungan, akan digunakan prinsip komplemen, dimana alih-alih menghitung langsung kemungkinan kejadian, akan dicari kemungkinan kejadian sebaliknya terjadi, kemudian hasilnya digunakan untuk mengurangi total kejadian yang

mungkin. Hasil pengurangan inilah yang merupakan nilai kemungkinan kejadian sesungguhnya.

Dimisalkan nilai kemungkinan seseorang membawa alel penyebab kelainan genetik sebagai C (dari kata *carried*/membawa).

1. Kemungkinan Seseorang membawa Alel Dominan pada Kelainan Genetik Dominan Autosomal

Dengan menggunakan prinsip komplemen, peluang seorang anak menjadi homozigot resesif (kedua alelnya bersifat resesif) adalah:

$$Hom_R = P_{R,Ayah} \times P_{R,Ibu}$$

Keterangan:

Hom_R : Peluang seorang anak menjadi homozigot resesif.

Adapun nilai dari P_R adalah:

Tipe	P_R
Ayah/ibu normal	1
Ayah/ibu penderita (homozigot dominan)	0
Ayah/ibu penderita (heterozigot)	0,5

Tabel 2. Nilai Peluang Alel Resesif Diwariskan pada Kelainan Genetik Dominan Autosomal

Adapun peluang seorang anak membawa alel dominan pada tubuhnya (apakah homozigot atau heterozigot) adalah:

$$C_D = 1 - Hom_R$$

$$C_D = 1 - P_{R,Ayah} \times P_{R,Ibu}$$

Keterangan:

C_D : Peluang seorang membawa (*carried*) alel dominan.

$P_{R,Ayah}$: Peluang mewarisi alel resesif dari ayah.

$P_{R,Ibu}$: Peluang mewarisi alel resesif dari ibu.

2. Kemungkinan Seseorang membawa Alel Resesif pada Kelainan Genetik Resesif Autosomal

Dengan menggunakan prinsip komplemen, peluang seorang anak menjadi homozigot dominan (kedua alelnya bersifat dominan) adalah:

$$Hom_D = P_{D,Ayah} \times P_{D,Ibu}$$

Keterangan:

Hom_D : Peluang seorang anak menjadi homozigot dominan.

Adapun nilai dari P_D adalah:

Tipe	P_D
Ayah/ibu normal	0
Ayah/ibu penderita (homozigot dominan)	1
Ayah/ibu penderita (heterozigot)	0,5

Tabel 3. Nilai Peluang Alel Dominan Diwariskan pada Kelainan Genetik Resesif Autosomal

Adapun peluang seorang anak membawa alel resesif pada tubuhnya (apakah homozigot atau heterozigot) adalah:

$$C_R = 1 - Hom_D$$

$$C_R = 1 - P_{D,Ayah} \times P_{D,Ibu}$$

Keterangan:

C_R : Peluang seorang membawa (*carried*) alel resesif.

$P_{D,Ayah}$: Peluang mewarisi alel dominan dari ayah.

$P_{D,Ibu}$: Peluang mewarisi alel dominan dari ibu.

c. Perhitungan Nilai Kemungkinan Seseorang Mewarisi Gen Penyebab Kelainan Genetik Terpaut Gonosom

1. Kemungkinan Seseorang membawa Alel Dominan pada Kelainan Genetik Dominan-X Gonosomal

Dengan menggunakan prinsip komplemen, peluang seorang anak menjadi homozigot resesif (kedua alelnya bersifat resesif) adalah:

$$Hom_R = P_{R,Ayah} \times P_{R,Ibu}$$

Nilai P_R sama dengan nilai pada **Tabel 2**.

Adapun peluang seorang anak membawa alel dominan pada tubuhnya (apakah homozigot atau heterozigot) adalah:

$$C_D = 1 - Hom_R$$

$$C_D = 1 - P_{R,Ayah} \times P_{R,Ibu}$$

2. Kemungkinan Seseorang membawa Alel Resesif pada Kelainan Genetik Resesif-X Gonosomal

Dengan menggunakan prinsip komplemen, peluang seorang anak menjadi homozigot resesif (kedua alelnya bersifat resesif) adalah:

$$Hom_D = P_{D,Ayah} \times P_{D,Ibu}$$

Nilai P_D sama dengan nilai pada **Tabel 3**.

Adapun peluang seorang anak membawa alel resesif pada tubuhnya (apakah homozigot atau heterozigot) adalah:

$$C_R = 1 - Hom_D$$

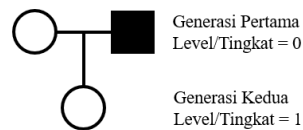
$$C_R = 1 - P_{D,Ayah} \times P_{D,Ibu}$$

3. Kemungkinan Seseorang membawa Alel Kelainan Kenetik pada Kromosom Y

Karena hanya laki-laki yang memiliki kromosom Y, maka jika seseorang menderita kelainan genetik terpaut kromosom Y, maka dapat dipastikan seluruh anak laki-laknya juga ikut mewarisinya, sehingga nilai $C = 1$. Jika yang terjadi sebaliknya, maka nilai $C = 0$. Adapun karena perempuan tidak mengandung kromosom Y, maka tidak peduli bagaimana ayahnya, peluang ia mewarisi gen kelainan genetik tersebut adalah 0 ($C = 0$).

B. Perhitungan Nilai Kemungkinan Seorang Mewarisi Gen Penyebab Kelainan Genetik berdasarkan Analisis Pohon Keluarga

Misal terdapat pohon keluarga yang hanya terdiri dari 2 generasi, yaitu orang tua dan anak, seperti pada gambar di bawah.



Gambar 8. Pohon Keluarga 2 Generasi
Sumber: Koleksi Pribadi

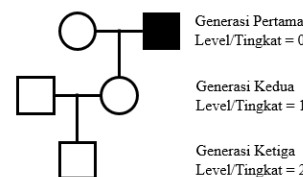
Maka peluang sang anak mewarisi gen penyebab kelainan genetik adalah:

$$C_{D,1} = 1 - P_{R,Ayah,1} \times P_{R,Ibu,1} \quad \text{untuk alel bersifat dominan}$$

$$C_{R,1} = 1 - P_{D,Ayah,1} \times P_{D,Ibu,1} \quad \text{untuk alel bersifat resesif}$$

Persamaan di atas berlaku baik untuk kelainan genetik autosomal maupun gonosomal.

Misal pohon keluarga tersebut bertambah satu generasi (terdapat cucu).



Gambar 9. Pohon Keluarga 3 Generasi
Sumber: Koleksi Pribadi

Maka berdasarkan aturan perkalian, peluang sang cucu mewarisi gen penyebab kelainan genetik dari kakek/neneknya adalah:

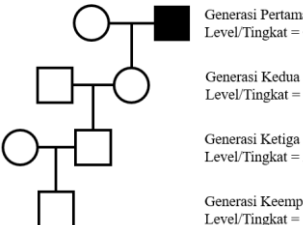
$$C_{D,2} = C_{D,1} \times (1 - P_{R,Ayah,2} \times P_{R,Ibu,2}) \quad \text{alel dominan}$$

$$= (1 - P_{R,Ayah,1} \times P_{R,Ibu,1}) \times (1 - P_{R,Ayah,2} \times P_{R,Ibu,2})$$

$$C_{R,2} = C_{R,1} \times (1 - P_{D,Ayah,2} \times P_{D,Ibu,2}) \quad \text{alel resesif}$$

$$= (1 - P_{D,Ayah,1} \times P_{D,Ibu,1}) \times (1 - P_{D,Ayah,2} \times P_{D,Ibu,2})$$

Misal pohon keluarga tersebut bertambah lagi satu generasi (terdapat cicit).



Gambar 10. Pohon Keluarga 4 Generasi
Sumber: Koleksi Pribadi

Maka berdasarkan aturan perkalian, peluang sang cicit mewarisi gen penyebab kelainan genetik dari kakek/neneknya adalah:

$$C_{D,3} = C_{D,2} \times (1 - P_{R,Ayah,3} \times P_{R,Ibu,3}) \quad \text{alel dominan}$$

$$= (1 - P_{R,Ayah,1} \times P_{R,Ibu,1}) \times (1 - P_{R,Ayah,2} \times P_{R,Ibu,2})$$

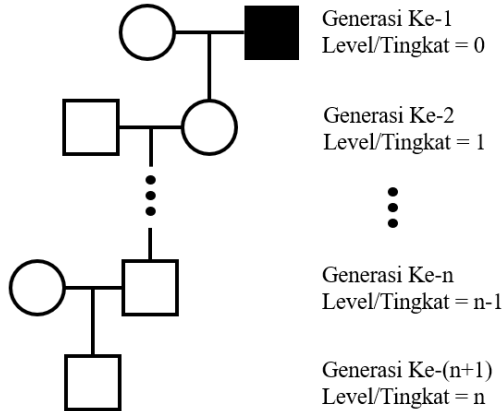
$$\times (1 - P_{R,Ayah,3} \times P_{R,Ibu,3})$$

$$C_{R,3} = C_{R,1} \times (1 - P_{D,Ayah,3} \times P_{D,Ibu,3}) \quad \text{alel resesif}$$

$$= (1 - P_{D,Ayah,1} \times P_{D,Ibu,1}) \times (1 - P_{D,Ayah,2} \times P_{D,Ibu,2})$$

$$\times (1 - P_{D,Ayah,3} \times P_{D,Ibu,3})$$

Berdasarkan penjabaran tersebut, jika terdapat (n+1) generasi, seperti pada gambar di bawah ini:



Gambar 11. Perampatan Pohon Keluarga (n+1) Generasi
Sumber: Koleksi Pribadi

Keterangan gambar:

Gambar Putih: Normal/tidak diketahui membawa atau tidak (tidak menderita kelainan genetik).

Gambar Hitam: Penderita kelainan genetik.

Peluang generasi terakhir (generasi ke n+1, tingkat = n) mewarisi gen penyebab kelainan genetik dari generasi teratasnya adalah:

1. Untuk alel yang bersifat dominan

$$C_{D,n} = (1 - P_{R,Ayah,1} \times P_{R,Ibu,1}) \times (1 - P_{R,Ayah,2} \times P_{R,Ibu,2}) \times \dots \times (1 - P_{R,Ayah,n} \times P_{R,Ibu,n})$$

$$C_{D,n} = \prod_{i=1}^n (1 - P_{R,Ayah,i} \times P_{R,Ibu,i})$$

2. Untuk alel yang bersifat resesif

$$C_{R,n} = (1 - P_{D,Ayah,1} \times P_{D,Ibu,1}) \times (1 - P_{D,Ayah,2} \times P_{D,Ibu,2}) \times \dots \times (1 - P_{D,Ayah,n} \times P_{D,Ibu,n})$$

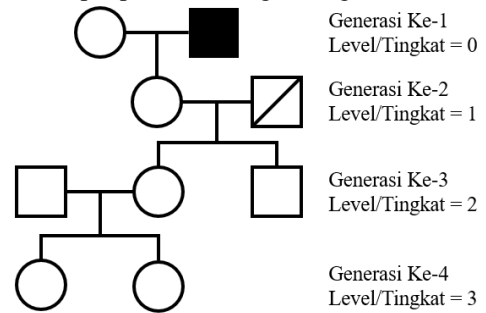
$$C_{R,n} = \prod_{i=1}^n (1 - P_{D,Ayah,i} \times P_{D,Ibu,i})$$

Generasi ke-0 yang dipilih adalah individu yang menderita kelainan genetik. Jika pada generasi tertentu terdapat individu yang mengalami kelainan genetik atau menikah dengan pasangan yang mengalami kelainan genetik, maka individu tersebut ditetapkan sebagai generasi ke-0 yang baru.

Individu-individu yang diikutkan dalam perhitungan adalah individu-individu yang berada pada lintasan yang menghubungkan individu generasi ke-1 hingga ke-(n+1).

C. Contoh Penerapan Persamaan yang Diperoleh

Misal terdapat pohon keluarga sebagai berikut:



Gambar 12. Contoh Kasus Pohon Keluarga
Sumber: Koleksi Pribadi

Keterangan gambar:

Gambar Putih dengan Diagonal: Heterozigot (seorang carrier).

Jika generasi pertama tersebut menderita buta warna (resesif autosomal) sedangkan pasangannya tidak membawa gen buta warna (homozigot dominan), maka peluang generasi terakhir (generasi ke 4, tingkat n = 3) mewarisi gen buta warna tersebut di dalam tubuhnya adalah:

$$C_{R,3} = \prod_{i=1}^3 (1 - P_{D,Ayah,i} \times P_{D,Ibu,i})$$

$$C_{R,3} = (1 - P_{D,Ayah,1} \times P_{D,Ibu,1}) \times (1 - P_{D,Ayah,2} \times P_{D,Ibu,2}) \times (1 - P_{D,Ayah,3} \times P_{D,Ibu,3})$$

$$C_{R,3} = (1 - P_{D,Ayah,1} \times P_{D,Ibu,1}) \times (1 - P_{D,Ayah,2} \times P_{D,Ibu,2}) \times (1 - P_{D,Ayah,3} \times P_{D,Ibu,3})$$

Untuk individu-individu yang berasal dari darah keturunan penderita, dianggap memiliki genotipe heterozigot. Adapun individu-individu di luar darah keturunan penderita dianggap homozigot dominan (bukan pembawa), kecuali dinyatakan lain. Maka persamaan sebelumnya menjadi:

$$C_{R,3} = (1 - 0 \times 1) \times (1 - 0,5 \times 0,5) \times (1 - 1 \times 0,5)$$

$$C_{R,3} = 1 \times 0,75 \times 0,5$$

$$C_{R,3} = 0,375$$

Atau dalam bentuk persentase adalah:

$$C_{R,3} = 37,5\%$$

Jadi, diperoleh peluang kemungkinan generasi ke-4 mewarisi gen buta warna dari generasi ke-1 adalah sebesar 37,5%.

IV. KESIMPULAN

Teori graf, pohon, dan kombinatorial pada matematika diskrit memiliki banyak kegunaan pada bidang-bidang ilmu yang lain, salah satunya dalam ilmu genetika. Dengan menggabungkan teori graf, pohon, dan kombinatorial, dengan teori ilmu genetika mengenai pewarisan sifat, kita dapat menghitung peluang seseorang mewarisi/membawa gen penyebab kelainan genetik dengan melacak pohon keluarganya.

Dalam teori genetika, penggunaan graf dan pohon sangat membantu dalam memodelkan silsilah keluarga. Adapun teori kombinatorial sangat membantu dalam proses perhitungan peluang suatu gen penyebab kelainan genetik akan terwariskan.

V. UCAPAN TERIMA KASIH

Pertama-tama, penulis mengucapkan puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan makalah ini dengan baik dan tepat waktu. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada orang tua karena selalu memberikan semangat dan dukungan, termasuk dalam proses pembuatan makalah ini. Tidak lupa, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Ibu Dr. Nur Ulfa Maulidevi, S.T, M.Sc. sebagai dosen mata kuliah IF2120 Matematika Diskrit kelas K01, karena telah memberikan bimbingan dan ilmu pengetahuan yang berharga dalam penyelesaian makalah ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada teman-teman yang telah membantu dalam penyelesaian makalah ini.

REFERENSI

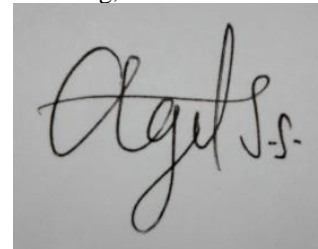
- [1] Darmayasa, Putu. 2016. *Aturan Perkalian, Aturan Penjumlahan, dan Faktorial*. https://www.konsep-matematika.com/2016/01/aturan-perkalian-aturan-penjumlahan-dan-faktorial.html#google_vignette (Diakses 8 Desember 2023).
- [2] Darmayasa, Putu. 2016. *Kombinasi pada Peluang dan Contohnya*. https://www.konsep-matematika.com/2016/01/kombinasi-pada-peluang-dan-contohnya.html#google_vignette (Diakses 8 Desember 2023).
- [3] Darmayasa, Putu. 2016. *Permutasi pada Peluang dan Contohnya*. <https://www.konsep-matematika.com/2016/01/permutasi-pada-peluang-dan-contohnya.html> (Diakses 8 Desember 2023).
- [4] Fitri, Susi Nurul. 2020. *MATERI GENETIK*. https://repositori.kemdikbud.go.id/22101/1/XII_Biologi_KD-3.3_Final.pdf (Diakses 9 Desember 2023).
- [5] Husnunnisa, Intan Aulia. 2023. *Family Tree (Pohon Keluarga) & Family Members Bahasa Inggris*. <https://www.english-academy.id/blog/family-tree-pohon-keluarga> (Diakses 8 Desember 2023).
- [6] Lewis, Ricki. 2009. *Human Genetics: Concepts and Applications, 9th Edition*. USA: The McGraw-Hill Companies.
- [7] Munir, Rinaldi. 2023. *Graf (Bagian 1)*. <https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/Matdis/2023-2024/19-Graf-Bagian1-2023.pdf> (Diakses 8 Desember 2023).
- [8] Munir, Rinaldi. 2023. *Kombinatorial (Bag. 2)*. <https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/Matdis/2023-2024/17-Kombinatorial-Bagian1-2023.pdf> (Diakses 8 Desember 2023).
- [9] Munir, Rinaldi. 2023. *Kombinatorial (Bag. 2)*. <https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/Matdis/2023-2024/18-Kombinatorial-Bagian2-2023.pdf> (Diakses 8 Desember 2023).
- [10] Munir, Rinaldi. 2023. *Pohon (Bag. 1)*. <https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/Matdis/2023-2024/22-Pohon-Bag1-2023.pdf> (Diakses 8 Desember 2023).
- [11] Munir, Rinaldi. 2023. *Pohon (Bag. 2)*. <https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/Matdis/2023-2024/23-Pohon-Bag2-2023.pdf> (Diakses 8 Desember 2023).

- [12] Nandy. 2021. *Materi Genetik: Gen, DNA, RNA & Kromosom*. <https://www.gramedia.com/literasi/genetik/#Gen> (Diakses 9 Desember 2023).
- [13] Rohmad. 2016. *Diktat Kuliah, Genetika Ternak*. <https://rohmatfapertanian.wordpress.com/diktat-genetika-ternak/bab-i-pendahuluan/> (Diakses 9 Desember 2023).
- [14] Rosana, Dadan. (n.d). *Struktur dan Fungsi DNA dan RNA*. <https://staffnew.uny.ac.id/upload/132058092/pendidikan/modul-3-struktur-dan-fungsi-dna-dan-rna1.pdf> (Diakses 9 Desember 2023).
- [15] Sourav, Bio. 2023. *Warisan Mendel & Genetika Mendel - Definisi, Eksperimen, Hukum, Pengecualian*. https://microbiologynote.com/id/pewarisan-mendelian-genetika-mendelian/#Law_of_Segregation_vs_Law_of_Independent_Assortment (Diakses 9 Desember 2023).
- [16] Unknown. (n.d). *Penyakit Keturunan/ Kelainan yang Terpaut Autosom*. <https://idschool.net/sma/penyakit-keturunan-kelainan-yang-terpaut-autosom/> (Diakses 9 Desember 2023).
- [17] Unknown. (n.d). *Penyakit Keturunan/ Kelainan yang Terpaut Gonosom*. <https://idschool.net/sma/penyakit-keturunan-kelainan-yang-terpaut-gonosom/> (Diakses 9 Desember 2023).
- [18] Unknown. 2021. *Kaidah Pencacahan 1. Aturan Penjumlahan dan Aturan Perkalian*. <https://www.catatanmatematika.com/2021/05/materi-kaidah-pencacahan-aturan-penjumlahan-dan-aturan-perkalian.html> (Diakses 8 Desember 2023).
- [19] Unknown. 2023. *Kromosom: Pengertian, Fungsi, Struktur, Jenis, dan Jumlahnya*. <https://www.pijarbelajar.id/blog/kromosom#pengertian-kromosom> (Diakses 9 Desember 2023).
- [20] Unknown. 2023. *Pengertian Materi Genetik DNA dan RNA*. <https://saintif.com/materi-genetik-dna-dan-rna/> (Diakses 9 Desember 2023).
- [21] Wahyuni, Febriana Dwi. (n.d). *Materi Genetik*. https://lms-paralel.esaunggul.ac.id/pluginfile.php?file=%2F84548%2Fmod_resource%2Fcontent%2F1%2F8_7482_KES102_112018.pdf (Diakses 9 Desember 2023).
- [22] Wirjosoemarto, Koesmadji. n.d. *Hukum Mendel dan Pewarisan Sifat*. <https://pustaka.ut.ac.id/lib/wp-content/uploads/pdfmk/PEB14311-M1.pdf> (Diakses 9 Desember 2023).

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa makalah yang saya tulis ini adalah tulisan saya sendiri, bukan saduran, atau terjemahan dari makalah orang lain, dan bukan plagiasi.

Bandung, 11 Desember 2023



Agil Fadillah Sabri
(13522006)