
Herd Immunity: Pengertian, Mekanisme, dan Model Matematis

Universitas Esa
Unggul Jakarta

Oleh: Ade Heryana, SST, MKM

Edisi-1: Juni 2016 Edisi-2: Maret 2021

HERD IMMUNITY: PENGERTIAN, MEKANISME DAN MODEL MATEMATIS

Oleh: Ade Heryana

PENDAHULUAN

Hingga Maret 2021 pandemi COVID-19 belum menunjukkan tanda-tanda penuruna eskalasi penularan meskipun sudah dilakukan vaksinasi di beberapa negara. Bahkan saat ini dihebohkan dengan penemuan mutasi baru dari virus SARS-CoV-2 yakni jenis B.1.1.7. Meski menurut para ahli tingkat keganasan mutasi baru ini tidak lebih berbahaya, namun daya penularannya lebih cepat. Beberapa pakar menyebut vaksin COVID-19 yang saat ini dipakai dapat mengatasi SARS-CoV-2 jenis B.1.1.7.

Tujuan program vaksinasi COVID-19 sebagaimana yang didengungkan para pengambil keputusan di bidang kesehatan adalah membentuk kekebalan pada suatu komunitas/populasi/kelompok masyarakat atau dikenal dengan Herd Immunity (HI). Di Indonesia target HI yang dicanangkan adalah 70% sesuai dengan karakteristik penyebaran COVID-19. Suatu kegiatan imunisasi setidaknya memiliki 3 manfaat yakni mencegah penularan penyakit, mengurangi risiko penyakit dalam grup, dan menunjang terjadinya herd immunity.

Lalu apakah sebenarnya yang dimaksud dengan HI? Bagaimana mekanisme HI membendung wabah penyakit? Bagaimana kita dapat menentukan bahwa HI pada suatu populasi telah mencapai 70% misalnya? Artikel yang awalnya dibuat penulis pada tahun 2015 ini dan direproduksi kembali tahun 2021 sehubungan dengan masalah penularan COVID-19 sejak

awal tahun 2020 bertujuan untuk menjawab ketiga pertanyaan di atas. Beberapa literatur penulis tambahkan untuk memperdalam konsep.

PENGERTIAN HERD IMMUNITY

Menurut Noor (2013) penularan penyakit dari orang ke orang memiliki 3 karakteristik utamayaitu 1) *Generation time*, yaitu jarak antara kasus yang satu ke kasus yang lainnya dalam satu penyakit, atau masa antara masuknya masuknya penyakit pada *host* tertentu, sampai dengan masa *host* tersebut secara maksimal mampu menularkan penyakit; 2) *Herd immunity*, yaitu keadaan kekebalan suatu kelompok/komunitas tertentu, atau tingkat kemampuan/daya tahan suatu komunitas tertentu terhadap serangan atau penyebaran penyebab penyakit menular tertentu; dan 3) *Attack rate*, yaitu rasio banyaknya kasus baru (tidak termasuk kasus pertama) terhadap banyaknya orang yang berisiko/rentan dalam satu populasi, pada periode waktu tertentu.

Kerentanan *host* akan penyakit menular salah satunya ditentukan oleh status imunisasi. Seperti halnya individu/*host*, penyebaran penyakit menular pada suatu populasi atau komunitas ditentukan oleh tingkat imunitas komunitas yang disebut dengan *Herd Immunity* (HI). Jadi dapat disimpulkan HI adalah salah satu karakteristik yang pasti ada atau muncul pada kasus penularan penyakit termasuk pada kondisi pandemi COVID-19. Ketika sejumlah individu dalam suatu kelompok/komunitas telah imun terhadap beberapa penyakit, maka ia bertindak sebagai “barrier” atau penghalang dari penyakit menular bagi individu yang tidak imun.

Penulis lain menyatakan *Herd Immunity* adalah tingkat kekebalan suatu kelompok atau komunitas terhadap serangan penyakit yang sebagian besar individunya telah memiliki imunitas, sehingga mengurangi kemungkinan individu yang sakit menularkan penyakitnya kepada individu yang rentan (Finn, 1993). Herd immunity juga diartikan sebagai proporsi individu yang resisten pada suatu populasi (Gerstman, 2003).

Tonggak awal herd immunity dimulai tahun 1923, dimana Topley dan Wilson menyusun paper yang berjudul "*the spread of bacterial infection: the problem of herd immunity*" (Fine, 1993). Secara ringkas tonggak sejarah *herd immunity* disajikan pada tabel 1 berikut:

Tabel 1. Tonggak Sejarah Herd Immunity

Tahun	Keterangan
1840	William Farr menulis "...smallpox dapat diatasi atau dicegah dengan vaksinasi yang dapat melindungi sebagian populasi...". Tulisan ini masih menginspirasi perdebatan tentang herd immunity hingga saat ini
1906	W.H. Hamer memperkenalkan teori <i>the mass-action principle</i> dalam konteks penyebaran penyakit cacar, sebagai dasar teori herd immunity
1923	Topley dan Wilson membuat publikasi yang pertama kali menyebut istilah "herd immunity" dalam paper berjudul " <i>the spread of bacterial infection: the problem of herd immunity</i> "
1957	MacDonald dalam konteks epidemiologi malaria, memperkenalkan konsep <i>basic case reproduction rate</i> , sebagai bagian dari dasar teori herd immunity
1971	W.H. Frost memperkenalkan salah satu teori dasar dalam herd immunity untuk komunitas tertutup yaitu <i>the Reed-Frost model</i>

Herd Immunity ada yang bawaan (*innate*) dan didapat (*acquired*). Pada *Innate Herd Immunity* ("Bawaan"), proporsi individu dalam populasi yang resisten terhadap infeksi, terjadi karena terdapat pajanan sebelumnya atau

karena mendapat imunisasi. Contohnya pada orang dengan kelainan sel darah sickle-cell, maka ketika terinfeksi plasmodium falciparum, jumlah parasitnya dalam darah relatif sedikit, serta relatif terlindung dari penyakit ganas. Contoh lainnya kekebalan suatu komunitas karena sudah ada yang terkena positif COVID-19.

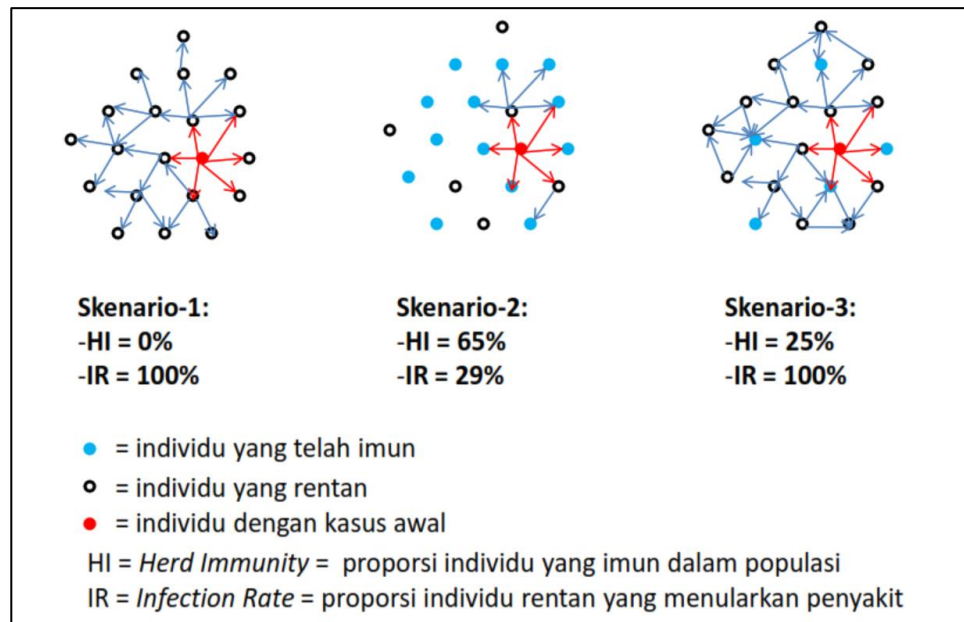
Sedangkan pada *Acquired Herd Immunity* ("Didapat"), proporsi individu dalam populasi yang resisten terhadap infeksi, terjadi karena baru saja terpajan atau mendapat imunisasi. Melalui *acquired herd immunity* inilah, tujuan utama program vaksinasi COVID-19 untuk mencapai tingkat cakupan yang efektif dan menghentikan penyakit sesuai dengan tujuan program, dapat terlaksana.

MEKANISME HERD IMMUNITY MEMBENDUNG WABAH

Skenario mekanisme HI membendung wabah penyakit menular dapat digambarkan pada grafik 1 diolah dari Gerstman (2003). Herd Immunity dapat membendung wabah suatu penyakit dengan skenario sebagai berikut:

- Misalnya satu populasi terdapat 20 individu dengan kasus awal pada 1 individu.
- Skenario-1, dengan herd immunity 0%. Per definisi dikatakan herd immunity adalah proporsi individu yang resisten pada suatu populasi. Sehingga pada skenario ini, jumlah individu yang resisten adalah $20 \times 0\% = 0$ individu.
- Skenario-2, dengan herd immunity 65%. Sehingga pada skenario ini, jumlah individu yang resisten adalah $20 \times 65\% = 13$ individu.

- Skenario-3, dengan herd immunity 25%. Sehingga pada skenario ini, jumlah individu yang resisten adalah $20 \times 25\% = 5$ individu.



Gambar 1. Skenario HI Membendung Wabah Penyakit

Dari skenario di atas dapat terlihat bahwa komunitas dengan dengan herd immunity tinggi (yakni Skenario-2 dengan herd immunity 65%) mampu membendung penyakit menular yang ditandai dengan infection rate rendah yaitu hanya 29%. Skenario-1 dan skenario-3 dengan herd immunity masing-masing 0% dan 25% infection rate-nya mencapai 100%.

Yang perlu menjadi perhatian pada Herd Immunity (Noor, 2013) adalah:

- Herd Immunity dianggap sebagai faktor utama kejadian wabah dalam masyarakat, serta kelangsungan penyakit pada suatu komunitas penduduk tertentu. Contohnya: penyakit cacar air dan campak yang mewabah pada periode tertentu sebelum dilakukan imunisasi;

- Proporsi Herd Immunity yang dianggap mempunyai daya tangkal mencegah penyakit, menurut teori adalah 70-80%. Dengan kata lain tidak mesti 100%. Namun teori di atas tidak berlaku untuk: 1) Masyarakat yang padat penduduk; 2) Kondisi bila nilai Herd Immunity nya tidak merata dalam masyarakat; dan 3) Pada penyakit difteri, karena sebagian yang telah mendapat vaksinasi difteri masih mungkin mengandung bakteri difteria, dan merupakan sumber penularan; dan
- Ada kemungkinan terdapat kantong-kantong kecil dalam masyarakat yang tanpa kekebalan, meskipun Herd Immunity nya tinggi. Hal ini mungkin disebabkan oleh: 1) Sosio-kultur yang berbeda; dan 2) Faktor lain dalam kelompok masyarakat tersebut.

MODEL MATEMATIS HERD IMMUNITY

Menurut Finn (1993) terdapat 3 model yang melandasi konsep *herd immunity* yakni: 1) *The mass-action principle* (prinsip aksi-massa); 2) *Case reproduction rates* (Tingkat reproduksi kasus); dan 3) *The Reed-Frost heterogenous population simulation approach* (pendekatan simulasi Reed-Frost pada populasi heterogen atau disebut *Reed-Frost Model*).

a. *The Mass-Action Principle (MAP)*

Teori yang dikembangkan Hammer tahun 1906 ini merupakan penelitiannya terhadap perkembangan penyakit cacar. Menurut Hammer, jumlah penyebaran (disebut *ability to infect* atau kemampuan menular) tiap kasus campak adalah fungsi dari jumlah individu rentan dalam satu populasi, secara matematis dapat dinyatakan:

$$\frac{C_{t+1}}{C_t} \text{ bervariasi terhadap } S_t \quad (1)$$

Dimana :

- S_t = jumlah individu yang rentan/*susceptible* pada periode t ;
- C_t = jumlah kasus pada periode t ;
- C_{t+1} = jumlah kasus pada periode selanjutnya atau $t+1$;
- C_{t+1}/C_t = jumlah penyebaran (sukses/positif) per kasus.

Formula (1) di atas dapat ditulis dengan formula sebagai berikut:

$$C_{t+1} = C_t S_t r \quad (2)$$

Dimana:

- r = parameter penyebaran/transmisi atau *contact rate* (tingkat kontak) yakni proporsi kemungkinan kontak penyakit antara individu rentan terhadap individu yang terinfeksi, yang mengakibatkan infeksi baru (individu rentan jadi individu terinfeksi). Misalnya: jika $r = 0,00005$ artinya dari 100.000 penduduk yang rentan pada suatu populasi kemungkinan ada 5 orang yang tertular dari orang yang sakit.
- Formula (2) di atas disebut juga "*law of mass action*" atau "hukum aksi-masa"

Disamping itu jumlah individu yang rentan pada periode selanjutnya dapat dihitung dengan formula:

$$S_{t+1} = S_t - C_{t+1} + B_t \quad (3)$$

Dimana:

- S_{t+1} = jumlah individu yang rentan pada periode $t+1$ (selanjutnya);

- B_t = jumlah penambahan individu yang rentan (jumlah individu rentan baru) yang masuk ke dalam populasi.

Contoh, suatu populasi pada tahun 2000 terdapat individu yang rentan terhadap penyakit X sebanyak 12000. Sedangkan jumlah kasus penyakit X pada tahun 2000 adalah 100. Pada tahun 2000 terjadi penambahan individu rentan sebanyak 300. Dengan *contact rate* penyakit X sebesar 0.0001, maka hitunglah berapa jumlah individu yang rentan dan jumlah kasus penyakit X pada tahun 2001.

Dari permasalahan di atas, $t = 2000$ sehingga diketahui bahwa $S_{2000} = 12000$, $C_{2000} = 100$, $B_{2000} = 300$, dan $r = 0.0001$. Maka dengan menggunakan formula (3) dapat dihitung jumlah kasus pada tahun 2001 yaitu

$$C_{t+1} = C_{2001} = C_{2000} \times S_{2000} \times r = 100 \times 12000 \times 0.0001 = 120 \text{ dan}$$

$$S_{t+1} = S_{2001} = S_{2000} - C_{2001} + B_{2000} = 12000 - 120 + 300 = 12.180$$

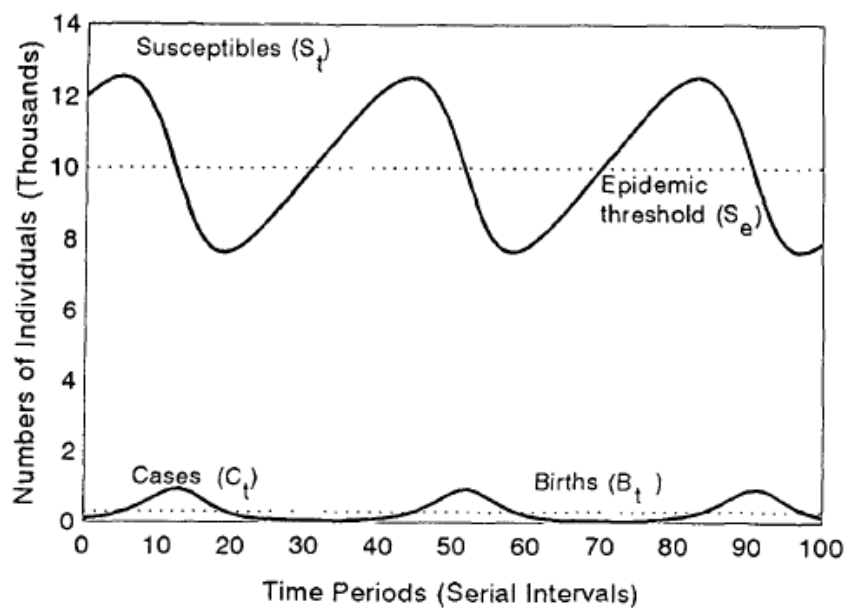
Sehingga dari contoh soal di atas, diperoleh perkiraan jumlah kasus pada tahun 2001 adalah 120 dan jumlah individu yang rentan pada tahun 2001 menjadi 12.180.

Contoh soal di atas bila dilakukan perhitungan hingga tahun ke-100 maka akan menghasilkan diagram sebagaimana grafik 2 berikut yang disebut dengan model *mass-action*. Model grafis pada gambar 1 antara lain dapat memprediksi:

1. Siklus insiden penularan penyakit (*infectious incidence* atau C_t) yang nilainya berfluktuasi di antara angka kelahiran atau

penambahan populasi (*Birth*, B_t) yang nilainya konstan per tahun atau tingkat masuknya individu rentan yang baru; dan

2. Siklus jumlah individu yang rentan (*Susceptibles*, S_t) yang nilainya berada di sekitar batasan epidemik (*epidemic threshold*, S_e), dimana $S_e = 1/r$. Pada kasus di atas dengan $r = 0.0001$, maka $S_e = 1/0.0001 = 10.000$ yang nilainya konstan per tahun.



Grafik 2. Model *mass-action* (sumber: Fine, 1993, hal. 269)

Dengan menggunakan batas epidemik (*epidemic threshold*, S_e) di atas maka dapat dihitung *herd immunity* (H) dengan formula sebagai berikut:

$$H = 1 - \frac{S_e}{T} = 1 - \frac{1}{rT} \quad (4)$$

Dimana:

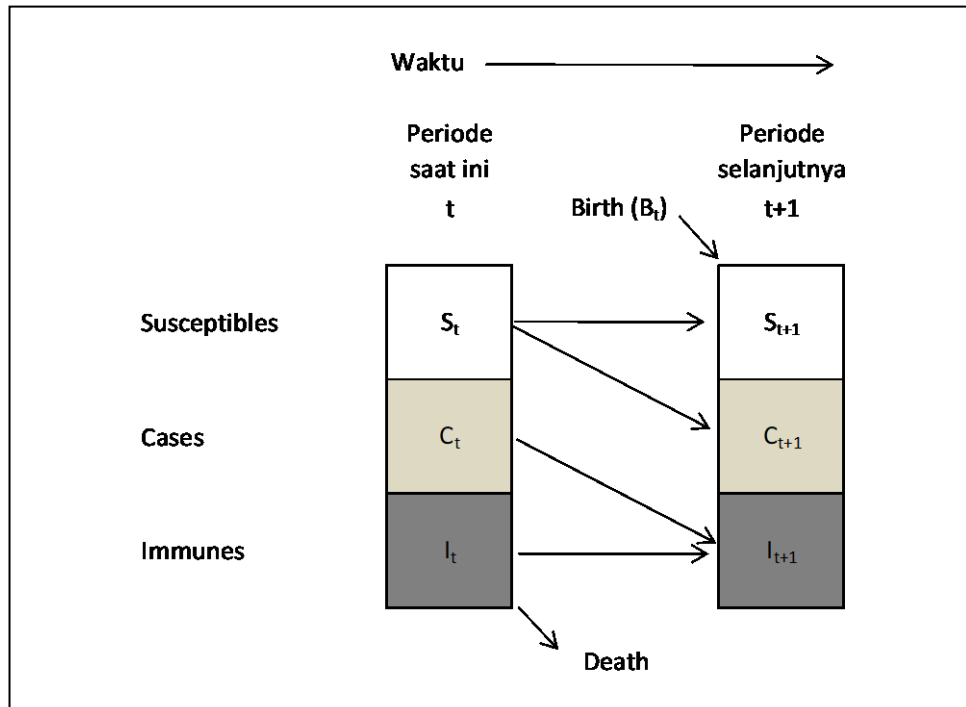
- T = jumlah total individu dalam populasi;

- S_e = epidemic threshold (batas epidemik jumlah individu yang rentan pada populasi);
- H = *herd immunity threshold* (batasan proporsi individu yang imun dalam populasi yang harus terjadi bila insiden penyakit akan diturunkan).

Pada kasus di atas bila total jumlah individu dalam populasi adalah 100.000, maka dengan tingkat kontak (r) = 0.0001, maka batasan *herd immunity* dihitung sebagai berikut:

$$H = 1 - \frac{1}{(0.0001 \times 100000)} = 1 - 0.1 = 0.9 = 90\%$$

Grafik 3.2 merupakan model hubungan *Susceptible (S)*, *Case (C)* dan *Immune (I)* yang menjelaskan dasar formula-formula di atas.



Grafik 3. Hubungan antara Susceptible (S), Cases (C) dan Immune (I) pada interval waktu t sampai t+1 pada model/teori aksi-massa (diolah dari: Fine, 1993, hal. 268)

Dari grafik 3 dapat dijelaskan mekanisme penularan penyakit sebagai berikut:

- a. Individu *susceptible* pada satu periode waktu tertentu (S_t) dapat menjadi kasus/cases pada waktu selanjutnya (C_{t+1}) atau tetap rentan/*susceptible* (S_{t+1});
- b. Individu yang terkena kasus pada periode saat ini (C_t) menjadi Imun pada periode selanjutnya (I_{t+1}). Kasus pada periode t (C_t) tidak menjadi kasus pada periode selanjutnya (C_{t+1}) atau dapat dikatakan bahwa kasus berada pada waktu interval seri;
- c. Total populasi dianggap konstan, sehingga penambahan individu (dalam bentuk *Birth*, B_t) selalu dibarengi dengan pengurangan individu (dalam bentuk *Death*). Itulah sebabnya formula (3) tidak secara eksplisit mencantumkan istilah “imun” atau notasi I . Sehingga jumlah individu imun pada periode tertentu (I_t) yang meninggalkan populasi, sama dengan individu rentan yang masuk ke dalam populasi (B_t).

b. Case Reproduction Rates (CRR)

Model HI ini dikembangkan pertama kali oleh G. Macdonald tahun 1957 dalam konteks penyebaran penyakit malaria. Landasan model ini adalah:

- Jika masih terjadi penyebaran penyakit (*infection*), maka setiap individu yang terinfeksi akan menginfeksi paling sedikit satu individu yang lain;

- Jika penyebaran penyakit (*infection*) tidak terjadi, maka penyebaran penyakit akan berangsur-angsur hilang dari populasi; dan
- Dalam konteks studi penyakit menular digunakan konsep *basic case reproduction rates* atau R_0

Definisi *basic case reproduction rates* (R_0) di atas dapat diturunkan berdasarkan formula (2) dengan menganggap $C_t = 1$, dan $S_t = T$ yang artinya adalah kasus tunggal ($C_t = 1$) masuk ke dalam populasi rentan secara keseluruhan ($S_t = T$). Dengan demikian jumlah kasus kedua menurut definisi di atas ekuivalen dengan *basic case reproduction rate* (R_0) dan bila dianalogikan ke formula (2) akan menghasilkan formula sebagai berikut:

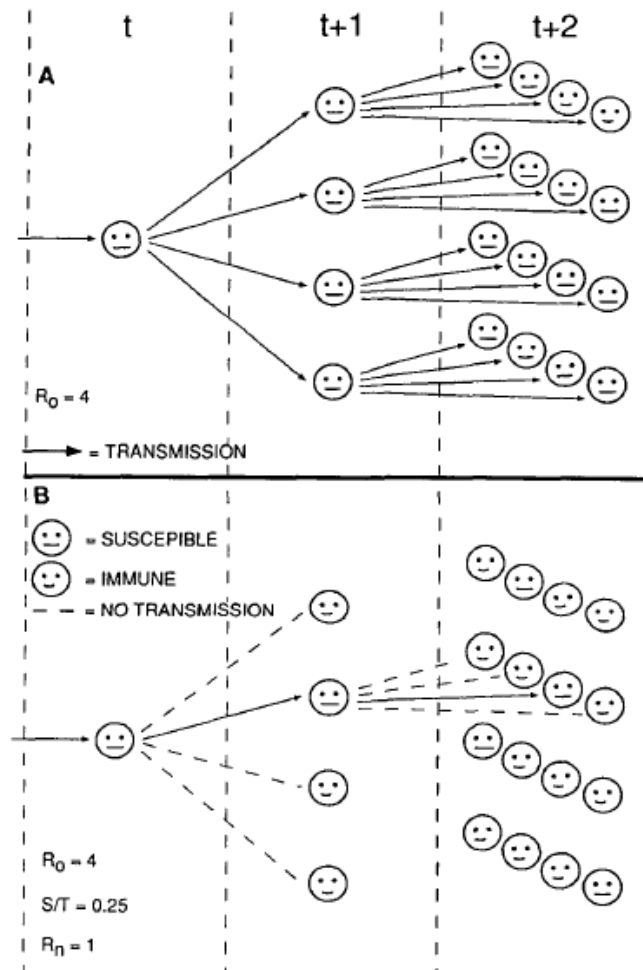
$$R_0 = C_{t+1} = C_t S_t r$$

$$R_0 = 1 \cdot T \cdot r = Tr \quad (5)$$

Persamaan (5) di atas menggambarkan potensi penyebaran penyakit infeksi pada suatu populasi dan merupakan fungsi dari mekanisme penyebaran secara biologis dan tingkat kontak (*contact rate*) atau interaksi di antara anggota populasi yang rentan. Beberapa penulis menyebut R_0 dengan istilah “*expected number of contacts*” atau “*contact number*” atau “*basic reproduction number*”.

Grafik 4 secara sederhana menggambarkan konsep *basic case reproduction rate* di atas. Dari grafik 3, terdapat konsep *net reproduction rate* yang didasarkan fakta bahwa penyebaran penyakit dalam kenyataannya tidak selalu efektif menular dari individu ke

individu lain. Misalnya karena ada beberapa individu sudah mendapatkan imunisasi.



Grafik 4. Ilustrasi penyebaran penyakit dengan *basic reproduction rate* $R_0=4$. Pada setiap interval waktu, setiap individu memiliki kontak penaktil yang efektif dengan 4 individu lainnya. Pada bagian A, seluruh populasi rentan sehingga insiden penyakit meningkat secara eksponensial kelipatan 4 setiap generasi. Proses ini berakhir sampai imunisasi memperlambat proses penularan. Pada bagian B, hanya 75% populasi yang imun, sehingga jumlah individu rentan, $S/T = 25\%$, dan hanya 1 individu yang bisa menyebarkan penyakit secara efektif, atau *net reproductive rate* $R_n = R_0(S/T) = 1$. (Sumber: Fine, 1993, hal. 273)

Pada bagian B grafik 4 *net reproduction rate* sama dengan *basic case reproduction* (R_0) dikali proporsi individu rentan pada satu populasi, atau

$$R_n = R_0 S_t/T \quad (6)$$

Bila infeksi endemik masih terjadi pada populasi yang konstan jumlah individunya, maka R_n akan terjadi pada waktu yang panjang dan menjadi angka rata-rata yang nilainya seragam sepanjang waktu, sehingga formula (6) di atas menjadi:

$$R_0 = T/\text{rata - rata } S_t = T/S_e \quad (7)$$

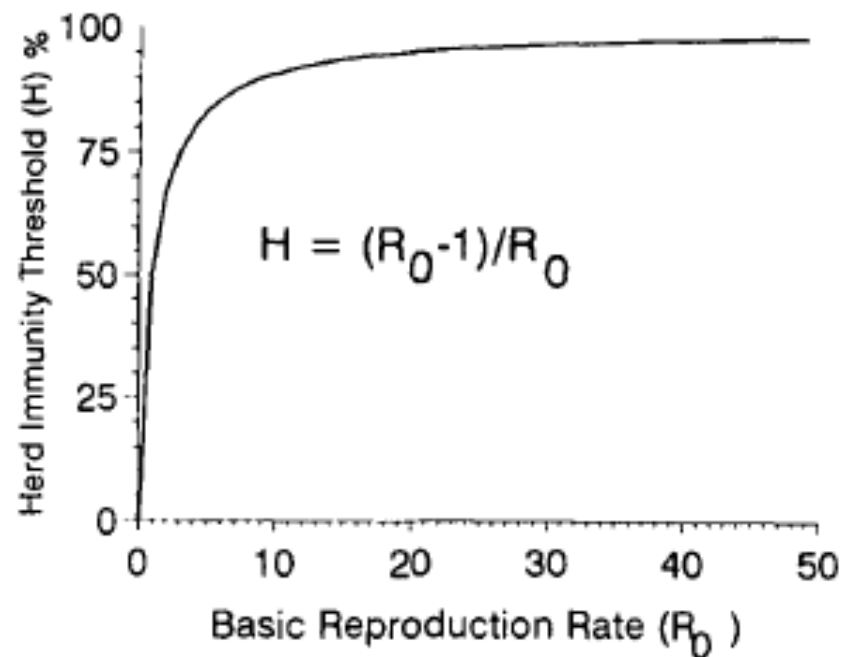
Pada kasus infeksi endemik, *basic case reproduction rate* akan sama dengan rata-rata proporsi individu rentan pada populasi (lihat grafik 3). Kombinasi formula (4) dan formula (7) menghasilkan perhitungan *herd immunity threshold* berdasarkan *basic case reproduction rate* R_0 berikut:

$$\text{Formula (4) } H = 1 - \frac{S_e}{T} = 1 - \frac{1}{rT}$$

$$\text{Fomula (7) } R_0 = T/\text{rata - rata } S_t = T/S_e$$

$$H = 1 - 1/R_0 = (R_0 - R_1)/R_0 \quad (8)$$

Hubungan antara herd immunity threshold H dengan basic reproduction rate R_0 disajikan pada grafik 5 berikut.



Grafik 4. Hubungan antara herd immunity threshold (H) dengan basic reproduction rate (R_0) sebagaimana formula (8) yang menunjukkan bahwa implikasi daya tahan dan eradikasi penyakit tergantung pada proporsi individu yang imun dalam populasi (Sumber: Fine, 1993, hal. 274)

c. ***The Reed-Frost Model (RFM)***

Model ini dikembangkan oleh JP Fox dan kawan-kawan pada tahun 1971 dan dinamakan model Reed-Frost yang didedikasikan kepada pengembang awal model ini yaitu Lowell Reed dan Wade Hampton Frost. Reed dan Frost mengasumsikan sebagaimana grafik 4 di atas, akan tetapi prediksi kasus pada periode $t+1$ dalam proses *mass-action* sebagaimana formula (2) ditulis sebagai berikut:

$$C_{t+1} = S_t \{1 - (1 - p)^{C_t}\} \quad (9)$$

Dimana: p adalah probabilitas kontak penyakit terjadi secara efektif.

Model ini telah lama diaplikasikan terhadap simulasi epidemik pada populasi tertutup, yakni populasi yang tidak ada penambahan individu rentan. Sehingga individu yang rentan pada periode selanjutnya ($t+1$) adalah

$$S_{t+1} = S_t - C_{t+1} \quad (10)$$

KESIMPULAN

Herd immunity merupakan tingkat kekebalan suatu populasi terhadap penularan penyakit yang dapat diperoleh secara bawaan maupun didapat dengan vaksinasi dan dinyatakan dalam persen. Secara umum tingkat kekebalan komunitas adalah pada kisaran 70-80% tergantung jenis penyakitnya. Mekanisme penanggulangan penyakit dengan herd immunity dijelaskan berdasarkan skenario jumlah orang sakit, imun dan rentan. Herd Immunity dapat dihitung dengan tiga model dasar matematis yang sudah dikenal sejak awal tahun 1990 yaitu mass-action theory, basic case reproduction rate dan model Reed-Frost.

REFERENSI

- Fine, P. (1993). Herd Immunity: History, Theory, Practice. *Epidemiologic Reviews Vol. 15 No.2*, John Hopkins University, School of Hygiene and Public Health.
- Gerstman, B. (2003). *Epidemiology Kept Simple*, New Jersey: John Willey & Sons.

Noor, N.N. (2013). *Pengantar Epidemiologi Penyakit Menular*. Jakarta: Rineka
Cipta

LATIHAN SOAL

Suatu populasi, saat ini berjumlah total 200.000, dimana terdapat individu yang rentan terhadap penyakit X sebanyak 10.000 dan jumlah kasus penyakit X pada saat ini adalah 100. Disamping itu, terjadi penambahan individu rentan sebanyak 300. Dengan contact rate penyakit X sebesar 0.0002, maka hitunglah :

1. Prediksi jumlah individu yang rentan dan jumlah kasus penyakit X setahun yang akan datang.
2. Herd immunity