

# Overview of Nuclear Reactor Physics and Kinetics

Rio Natanael Wijaya

Follow Up Training Course on  
Reactor Engineering and Safety:  
High-Temperature Gas-Cooled Reactor

Yogyakarta, 18 - 22 May 2026



# Biodata



**Rio Natanael Wijaya**

**Lecturer**

**Politeknik Teknologi  
Nuklir Indonesia**

[rio.natanael@polteknuklir.ac.id](mailto:rio.natanael@polteknuklir.ac.id)

## Education

- Bachelor: Theoretical Physics, ITB (2012)
- Master: Theoretical Physics, ITB (2013)
- Doctorate: Theoretical Physics, ITB (2019)

## Professional Experience

- Physics Script Writer, Pesona Edukasi (2013 – 2016)
- Lecturer, Poltek Nuklir (2019 – now)

# Learning Objectives

Menjelaskan interaksi dasar neutron dengan material

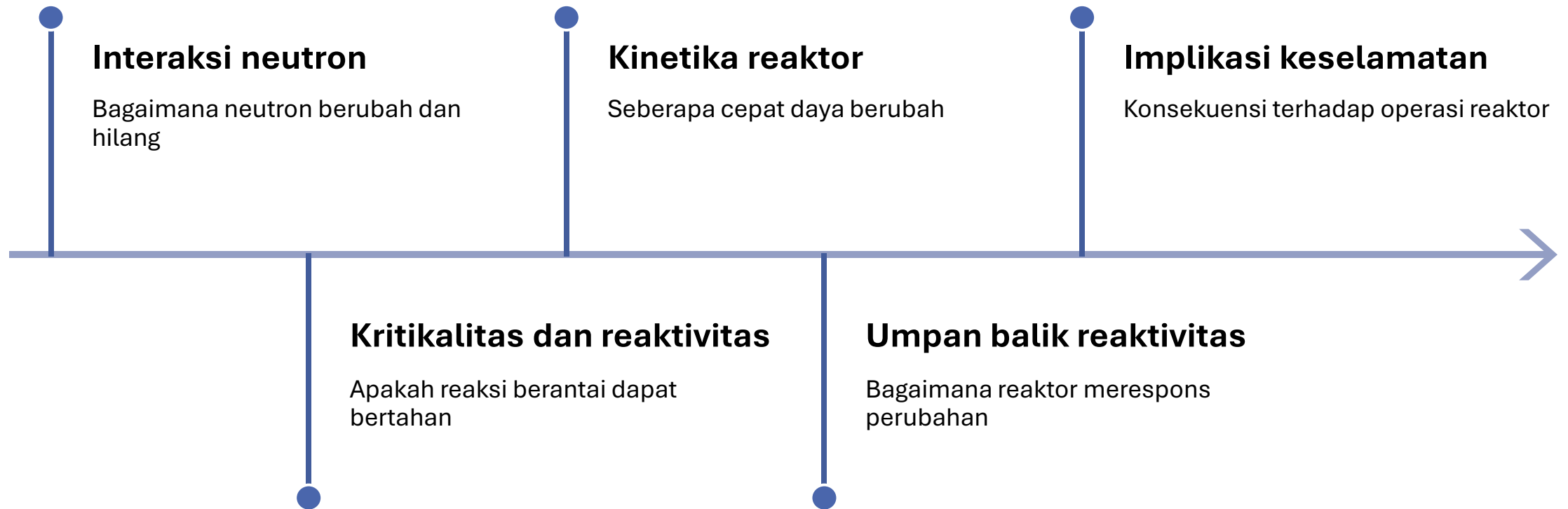
Menjelaskan konsep kritikalitas dan reaktivitas

Menjelaskan konsep kinetika reaktor

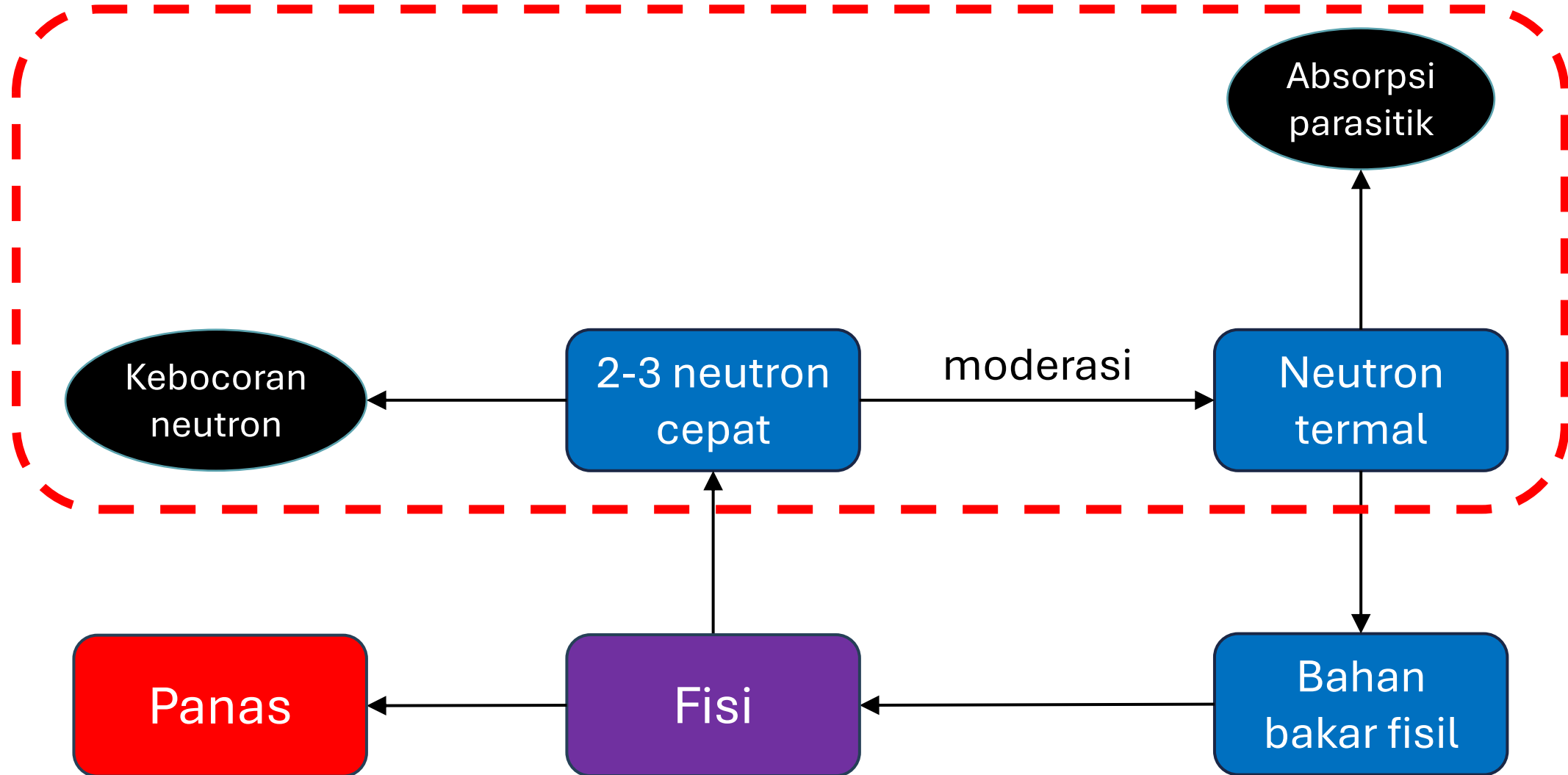
Mengidentifikasi mekanisme *feedback* reaktivitas

Menjelaskan implikasi konsep *delayed neutron* dan *feedback* reaktivitas pada keselamatan reaktor

# Alur Pembahasan



# Siklus Neutron dalam Reaktor



# Interaksi Dasar Neutron dalam Reaktor

*Empat interaksi utama yang menentukan nasib neutron dalam reaktor*

## Hamburan elastik

- Energi berubah
- Arah berubah

## Hamburan non-elastik

- Neutron kehilangan energi

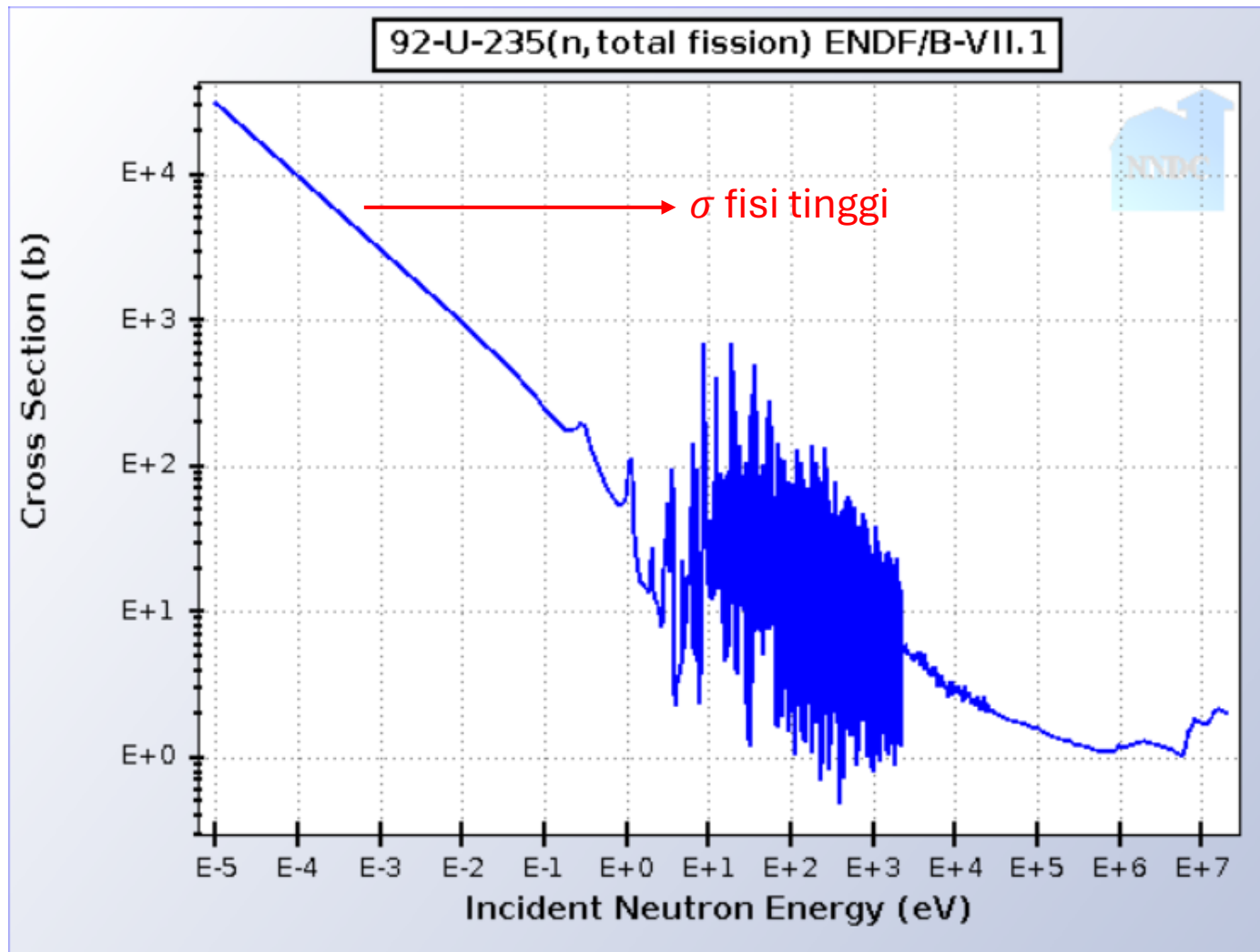
## Absorpsi

- Neutron hilang

## Fisi

- Neutron baru dihasilkan

# Mengapa Neutron Diperlambat?



$\sigma$ : tampang lintang mikroskopik

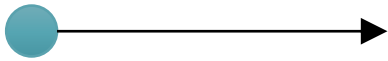
*Probabilitas interaksi neutron dengan inti*

*Pesan utama*

U-235 memiliki probabilitas fisi yang jauh lebih tinggi pada energi rendah (energi termal)

# Neutron yang Melewati Material...

Neutron



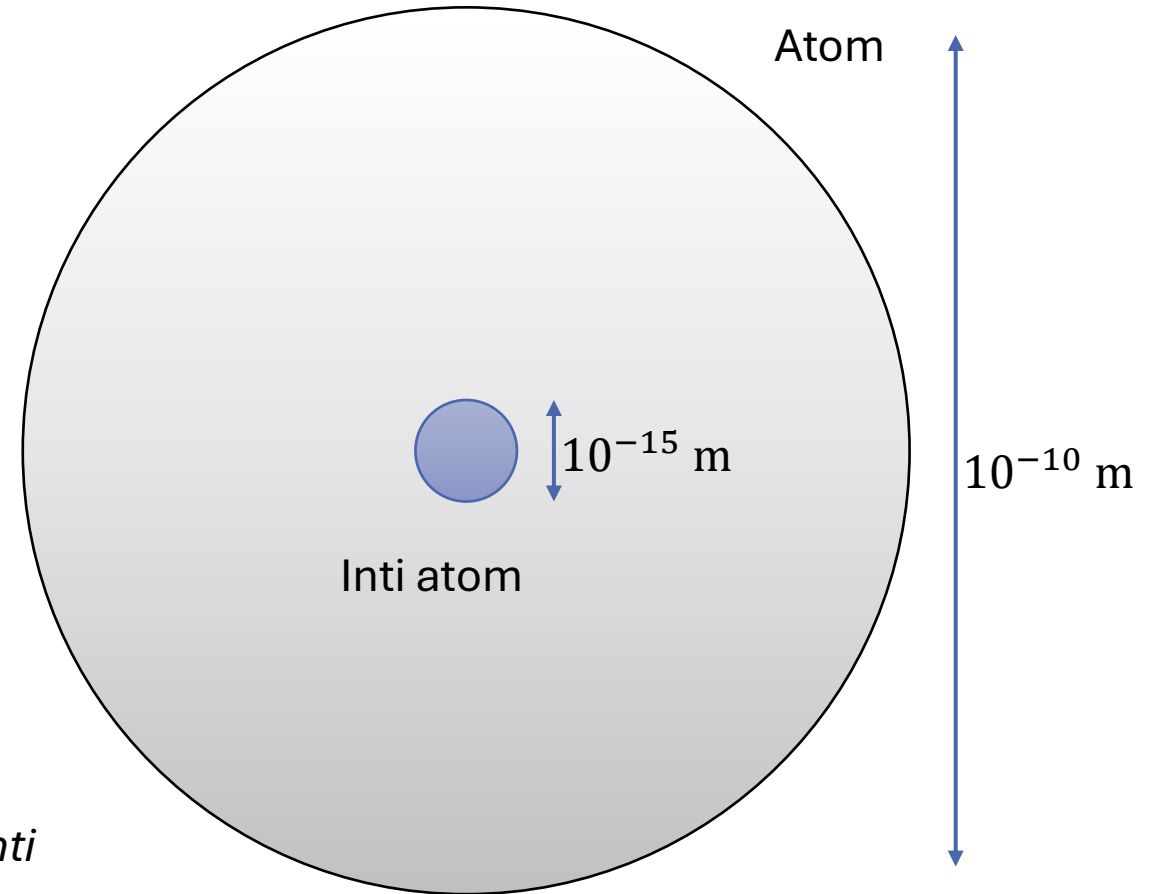
Reaksi nuklir bersifat probabilistik.

$\sigma$

*Tampang lintang mikroskopik*

*Ukuran efektif probabilitas interaksi neutron dengan inti*

$$1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$



Jari-jari atom 100.000 kali lebih besar dari inti atom.

Jika inti atom sebesar bola tenis, maka atomnya akan sebesar kota Jogja.

# Probabilitas Interaksi

*Probabilitas interaksi per satuan panjang.*

$$\Sigma = N\sigma$$

$N$ : densitas atom (atom/cm<sup>3</sup>)

$\sigma$ : tampang lintang mikroskopik (barns)

Lintasan bebas rata-rata (*mean free path*)

$$\lambda = \frac{1}{\Sigma}$$

# Atenuasi Neutron

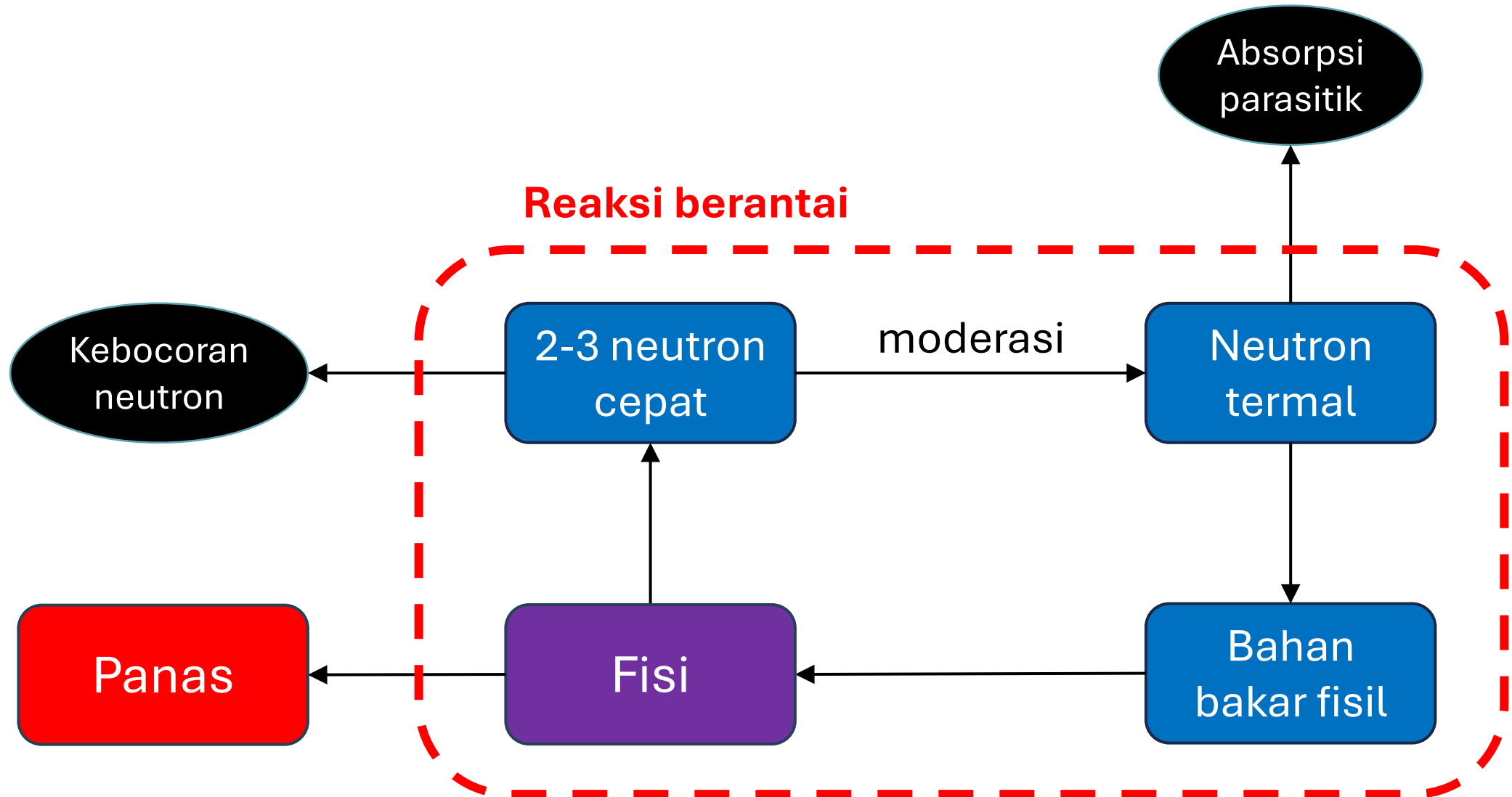
$$I(x) = I_0 e^{-\Sigma x}$$

Probabilitas neutron bertahan berkurang secara eksponensial sepanjang lintasan

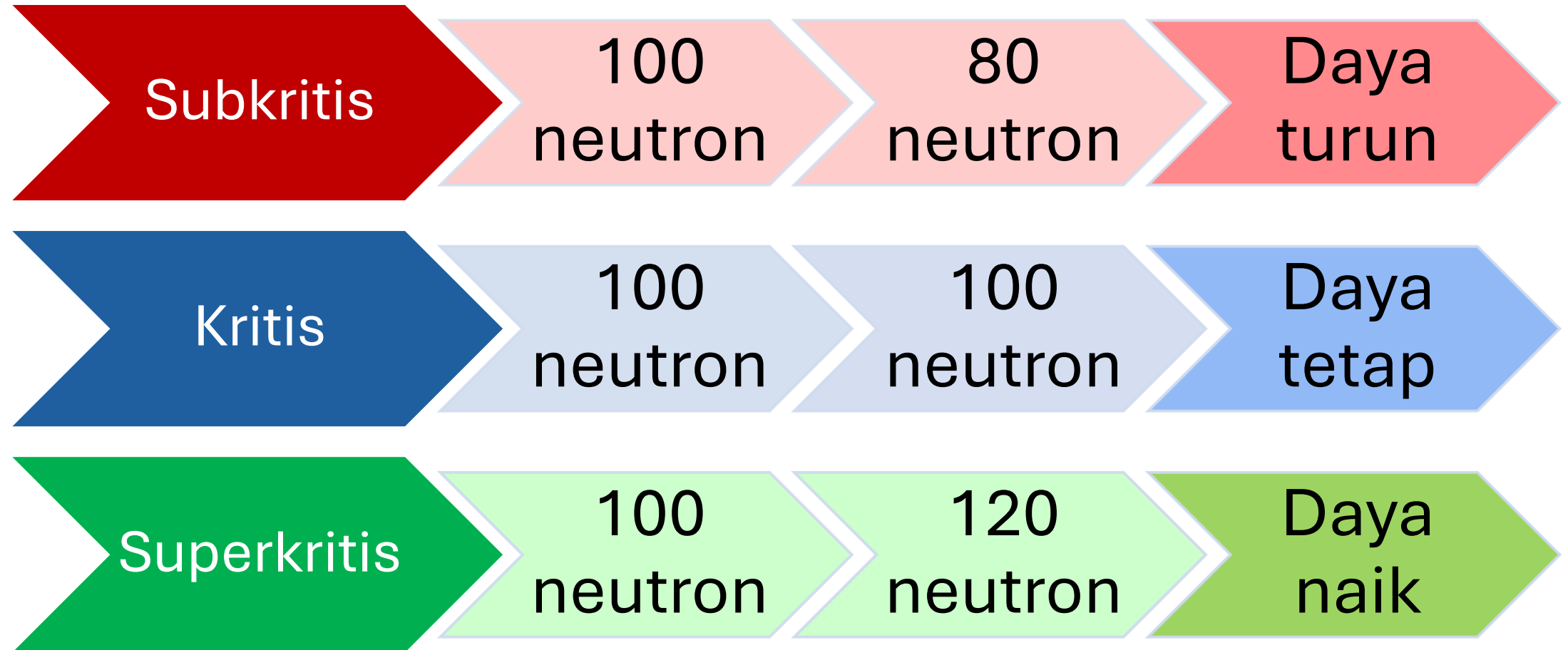
Semakin jauh neutron bergerak, semakin besar peluang mengalami interaksi.

$$P(\text{interaksi}) = 1 - e^{-\Sigma x}$$

# Siklus Neutron dalam Reaktor



# Kapan Reaksi Berantai Bertahan?



Keseimbangan antara neutron yang diproduksi dan neutron yang hilang menentukan kondisi reaktor.

# Faktor Multiplikasi Efektif

*Ukuran kuantitatif keberlangsungan reaksi berantai*

$$k_{eff} = \frac{\text{jumlah neutron generasi } (n + 1)}{\text{jumlah neutron generasi } n}$$

Kondisi	Nilai $k_{eff}$	Populasi Neutron
Subkritis	$k_{eff} < 1$	Berkurang
Kritis	$k_{eff} = 1$	Tetap
Superkritis	$k_{eff} > 1$	Bertambah

Kenapa **efektif**?

*Karena sudah memperhitungkan seluruh faktor yang mempengaruhi produksi dan kehilangan neutron*

# Contoh Perhitungan $k_{eff}$

**Subkritis**

$$n_0 = 100$$

$$n_1 = 80$$

$$k_{eff} = 0,8$$

**Kritis**

$$n_0 = 100$$

$$n_1 = 100$$

$$k_{eff} = 1,0$$

**Superkritis**

$$n_0 = 100$$

$$n_1 = 120$$

$$k_{eff} = 1,2$$

# Reaktivitas Reaktor

*Ukuran deviasi reaktor dari kondisi kritis*

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}}$$

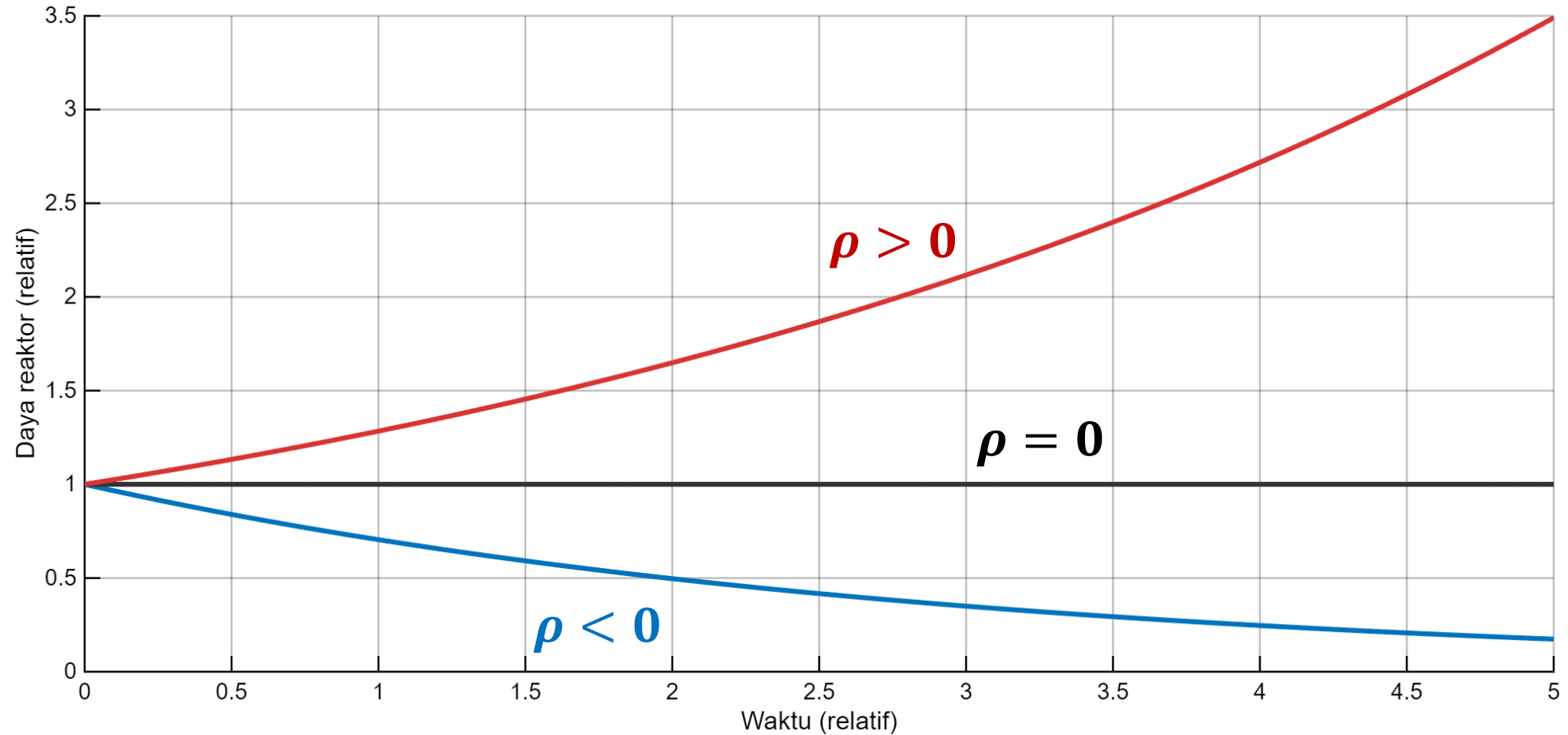
Kondisi	Nilai $\rho$
Subkritis	$\rho < 0$
Kritis	$\rho = 0$
Superkritis	$\rho > 0$

Reaktivitas mempermudah kuantifikasi deviasi dari kondisi kritis.

Jika  $k_{eff} = 1,2$ , maka  $\rho = \frac{1,2-1}{1,2} = 0,167$

# Kinetika Reaktor

*Seberapa cepat daya reaktor berubah*



Reaktivitas menentukan arah, kinetika menentukan kecepatannya.

# Waktu Generasi Neutron

# Mengapa Reaktor Bisa Dikendalikan?

## ***Prompt Neutron (~99,35%)***

Muncul seketika setelah reaksi fisi

Waktu: order mikrosekond

Terlalu cepat untuk dikendalikan

## ***Delayed Neutron (~0,65%)***

Muncul dari peluruhan produk fisi

Waktu: milisekond hingga puluhan detik

Memberikan waktu pengendalian reaktor

Reaktor dapat dikontrol karena sebagian kecil neutron muncul terlambat.

# Kondisi *Prompt Critical*

Kondisi	Reaktivitas	Daya Reaktor
Subkritis	$\rho < 0$	Turun
Kritis	$\rho = 0$	Stabil
<i>Delayed critical</i>	$0 < \rho < \beta$	Naik terkendali
<i>Prompt critical</i>	$\rho = \beta$	Naik dengan cepat
<i>Super prompt critical</i>	$\rho > \beta$	Naik tak terkendali

# Daya Reaktor

$$n_i = n_0 k^i$$

$$i = \frac{t}{\Lambda}$$

$$n(t) = n_0 k^{t/\Lambda}$$

$$n(t) = n_0 e^{(\ln k) t/\Lambda}$$

$$\left. \begin{array}{l} P \propto n \\ \frac{1}{T} = \frac{\ln k}{\Lambda} \end{array} \right\} \rightarrow P(t) = P_0 e^{t/T}$$

$T$ : periode reaktor

$T$  besar  $\rightarrow$  respons lambat

$T$  kecil  $\rightarrow$  respons cepat

# Persamaan Kinetika Titik

Laju perubahan neutron = produksi neutron – neutron yang hilang + kontribusi delayed neutron

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i$$

$n$ : densitas neutron

$\rho$ : reaktivitas

$\beta$ : total fraksi *delayed neutron*

$\Lambda$ : waktu generasi neutron

$\lambda_i$ : konstanta peluruhan *delayed neutron*

$C_i$ : densitas prekursor dari *delayed neutron*

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n - \lambda_i C_i$$

# Feedback Reaktivitas

## Feedback Positif

$P \uparrow$

$T \uparrow$

$\rho \uparrow$

$P \uparrow\uparrow$

**Berbahaya**

Reaktivitas  
( $\rho$ )

Suhu  
( $T$ )

Daya  
( $P$ )

## Feedback Negatif

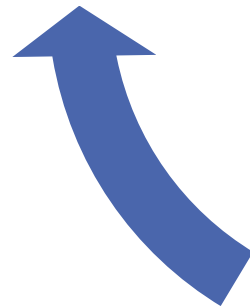
$P \uparrow$

$T \uparrow$

$\rho \downarrow$

$P \downarrow$

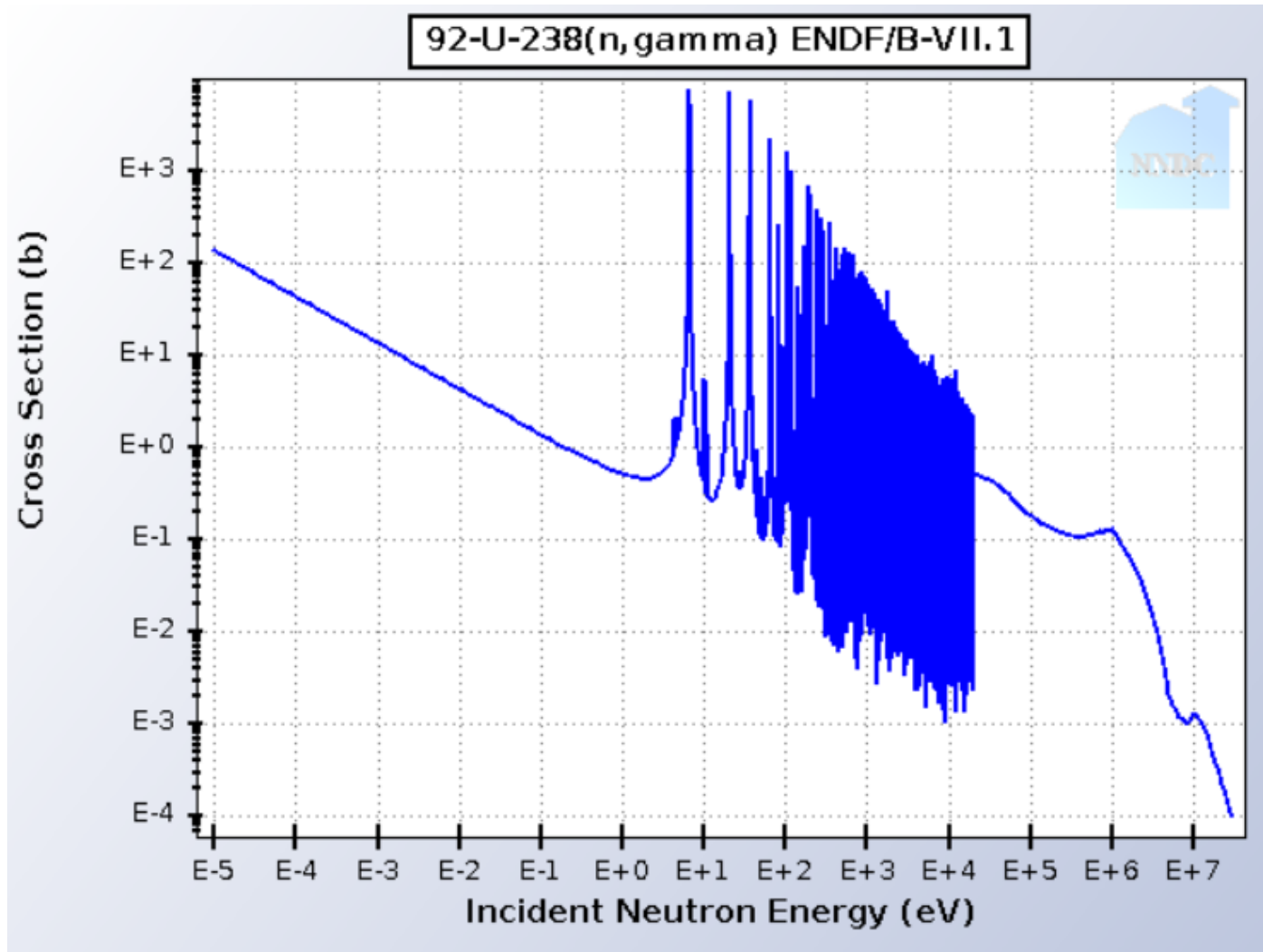
**Stabil**



# Mekanisme *Feedback* Reaktivitas

Mekanisme	Penyebab	Dampak	Waktu Respons
<i>Feedback</i> Doppler	Suhu bahan bakar naik, resonansi absorpsi U-238 melebar	Reaktivitas turun	Sangat cepat
<i>Feedback</i> moderator	Perubahan kondisi moderator	Biasanya reaktivitas turun (LWR)	Cepat
<i>Feedback</i> ruang hampa ( <i>void</i> )	Pembentukan <i>bubble</i> / <i>void</i> pada pendingin	Tergantung desain	Cepat
<i>Feedback</i> ekspansi inti	Pemuain termal struktur inti / perubahan geometri	Biasanya reaktivitas turun	Cepat-sedang
<i>Feedback</i> Xenon	Akumulasi Xe-135	Reaktivitas turun	Lambat

# Feedback Doppler



U-238 memiliki resonansi absorpsi neutron.

Suhu meningkat membuat puncak resonansi melebar (*Doppler broadening*).

Lebih banyak neutron diserap U-238

Reaktivitas turun

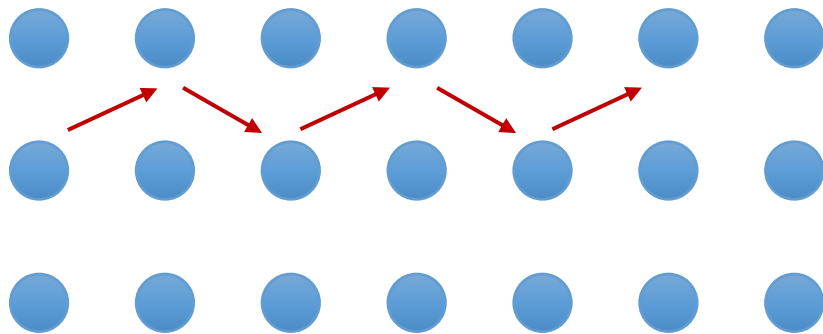
*Pesan utama*

Semakin tinggi suhu, resonansi Doppler semakin lebar, dan U-238 menyerap lebih banyak neutron.

# Feedback Moderator

Misal reaktor dengan moderator air.

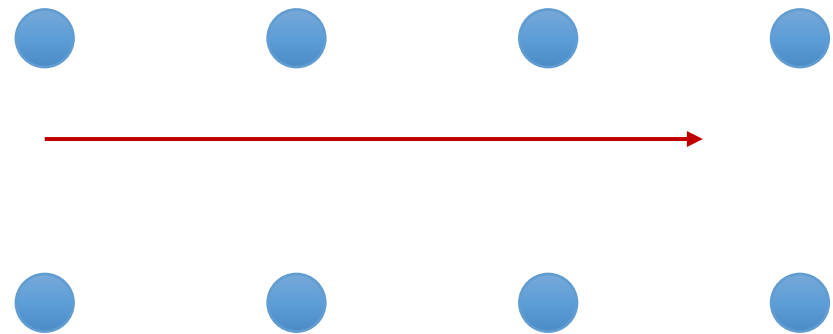
Suhu rendah, densitas tinggi



Moderasi efektif, neutron termal bertambah

Laju fisi U-235 meningkat

Suhu tinggi, densitas rendah



Moderasi melemah, neutron termal berkurang

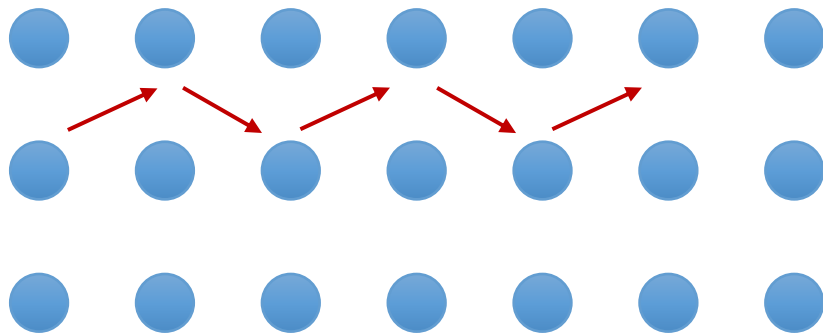
Laju fisi U-235 berkurang

Pada reaktor dengan moderator air, meningkatnya suhu moderator akan menurunkan reaktivitas.

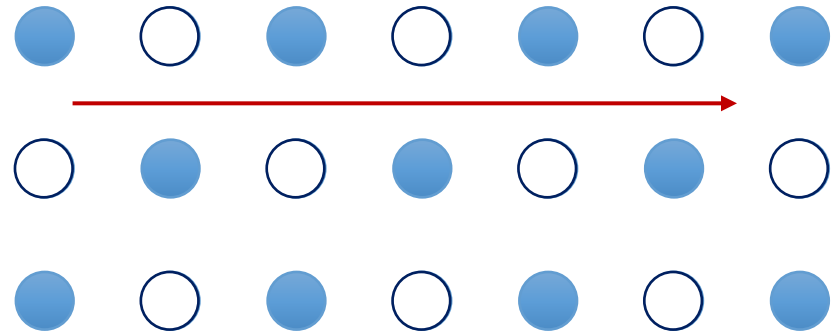
# Feedback Ruang Hampa (*Void*)

Misal reaktor dengan moderator air.

Sedikit *void* (sedikit *bubble*)



*Void* tinggi (banyak *bubble*)



Moderasi menurun



Reaktivitas menurun

Absorpsi moderator menurun

menurun

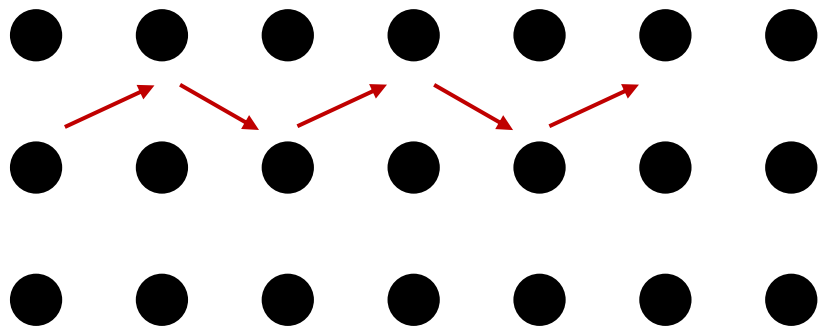


Reaktivitas meningkat

Keseimbangan antara moderasi dan absorpsi akibat *void* bergantung pada desain reaktor.

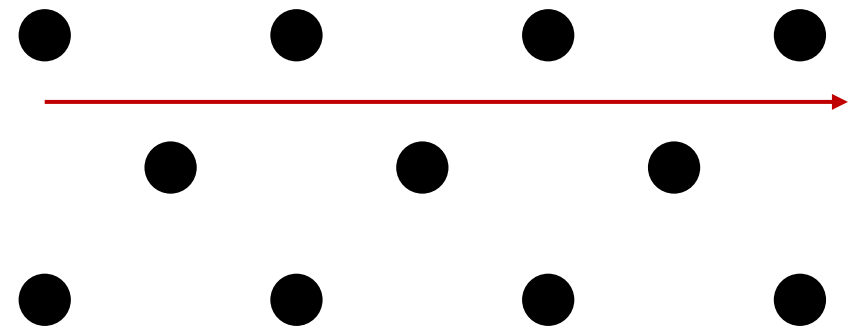
# Feedback Ekspansi Inti

Suhu rendah, inti kompak



Interaksi neutron lebih efektif

Suhu tinggi, inti memuai

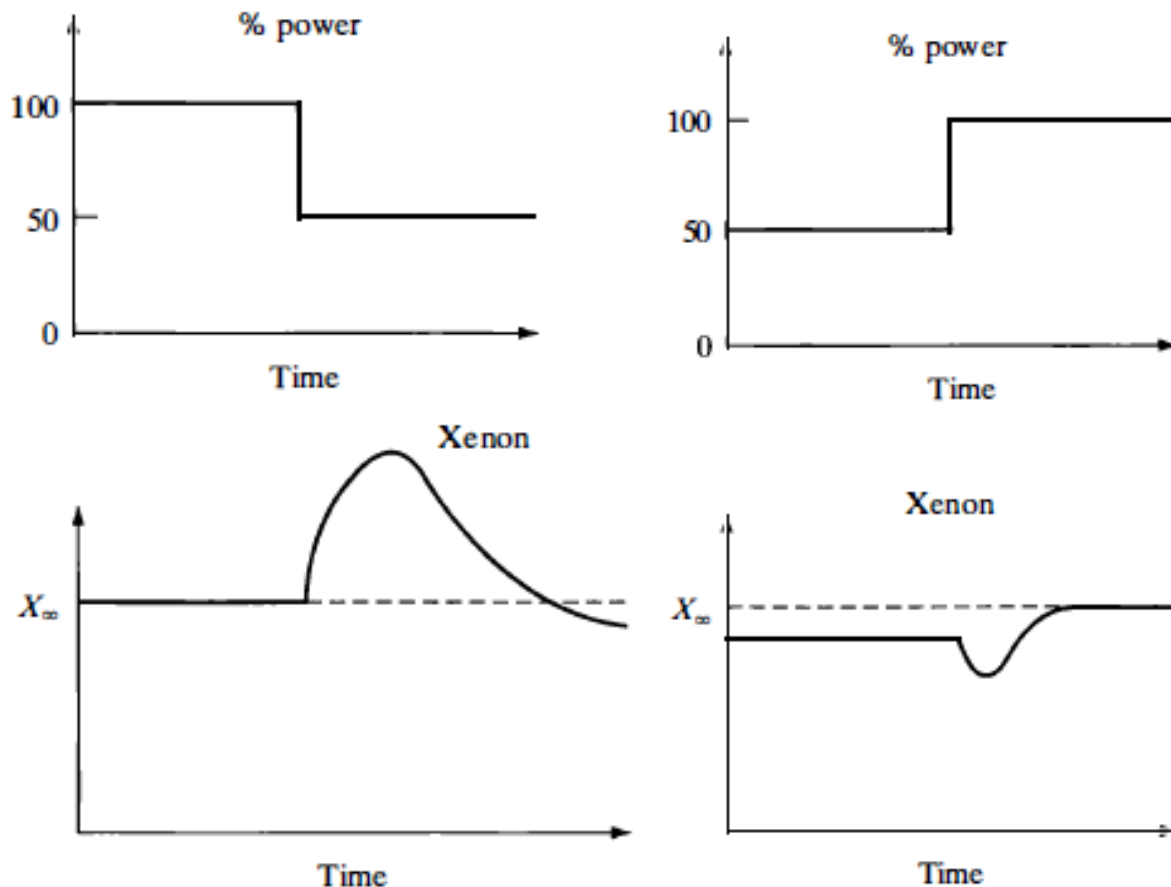
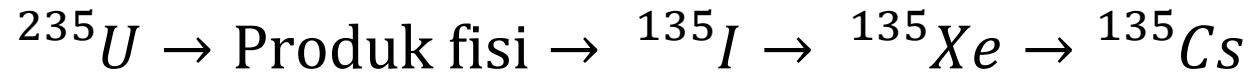


Interaksi kurang efektif, kebocoran meningkat

Reaktivitas menurun

Pemuaian inti biasanya memberikan *feedback* negatif alami.

# Feedback Xenon (Racun Xenon)



Untuk neutron termal:

U-235:  $\sigma_a \approx 580$  barns

Xe-135:  $\sigma_a \approx 2 \times 10^6$  barns,  $t_{1/2} \approx 9,2$  jam

Penumpukan Xenon dalam inti reaktor mengurangi reaktivitas.

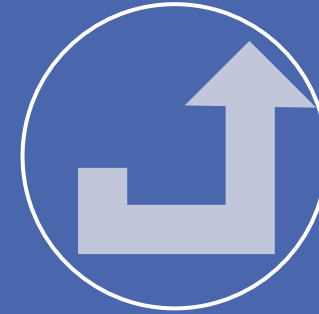
Setelah *shutdown*, reaktor sulit untuk *startup* lagi karena konsentrasi Xenon yang tinggi.

# Implikasi Keselamatan Reaktor



## *Delayed Neutron*

- Kunci pengendalian reaktor
- Margin waktu



## *Feedback Reaktivitas Negatif*

- Cenderung menstabilkan diri
- Margin kestabilan



**Terima kasih**

