Komputasi Paralel

Pekan 3
Paralel Programming

Definisi

- Task & Parallel Task
- Serial Execution & Parallel Execution
- Shared Memory & Distributed Memory
- Communication & Locality
- Synchronization
- Granularity
- Observed Speedup
- Parallel Overhead

Task

- **Task** : bagian dari pekerjaan komputasi yang diskrit. bisa berupa program atau instruksi yang dieksekusi oleh prosesor
- **Parallel Task** : task yang dapat dikerjakan oleh beberapa prosesor dan tetap menghasilkan hasil yang benar.

Execution

- **Serial Execution** : Eksekusi program secara sekuensial, sebuah statement pada satu waktu. semua program paralel memiliki bagian program yang harus dijalankan secara serial.
- **Parallel Execution** : Eksekusi program oleh lebih dari satu task. setiap task bisa mengeksekusi statement yang sama ataupun berbeda pada satu waktu.

Shared vs Distributed

- Sebagai arsitektur hardware
  - shared : semua prosesor memiliki akses fisik ke memori bersama
  - distributed : masing masing prosesor memiliki memori sendiri
- Sebagai model pemrograman
  - shared : setiap prosesor melihat memori bersama secara logicalnya, meski secara fisiknya memori tersebut terpisah
  - distributed : setiap task hanya melihat lokal memori dan harus berkomunikasi untuk mengakses memori pada prosesor lain.

Communication

- Cara task pada pemrograman paralel untuk bertukar data
  - message passing
  - shared memory
- Akses ke **memori lokal** (node yang sama) lebih murah dibandingkan akses ke **memori remote** (node yang berbeda).
- Sehingga akses ke data lokal seharusnya lebih sering dibandingkan data remote (***locality***)

Synchronization

- Koordinasi task paralel secara real time. Biasanya diimplementasikan dengan cara membuat titik singkronisasi (synchronization poin) dimana task tidak bisa melanjutkan dulu sebelum semua task lain mencapai titik tersebut.
- Melibatkan lebih dari satu task, dan menyebabkan waktu proses program paralel meningkat

Granularity

- Ukuran kualitatif dari rasio komputasi terhadap komunikasi
  - **Coarse grained** : komputasi besar diantara komunikasi antar task
  - **Fine grained** : komputasi kecil diantara komunikasi antar task

Observed Speedup

- Indikator paling sederhana untuk melihat peningkatan performa program paralel

$$\frac{\text{waktu eksekusi program serial}}{\text{waktu eksekusi program paralel}}$$

Amdahl Law

- Tahun 1967, Gene Amdahl memformulasikan performance benefit yang bisa diperoleh dari sebuah program paralel. Dengan **mengasumsikan** sbb :
  - Ada aplikasi sekuensial yang perlu waktu sebanyak T untuk diproses pada CPU tunggal
  - Aplikasinya memiliki α bagian yang bisa diparalelkan ($0 \leq \alpha \leq 1$). sisanya tetap harus dilakukan secara sekuensial
  - Eksekusi program secara paralel tidak membutuhkan overhead komunikasi, dan bagian paralelnya dapat dibagi secara rata terhadap berapapun jumlah CPU.

Amdahl Law

- Dengan asumsi tersebut, speedup yang diperoleh dengan menggunakan N buah node adalah sebagai berikut

$$speedup = \frac{t_{seq}}{t_{par}} = \frac{T}{(1-\alpha)T + \frac{\alpha \cdot T}{N}} = \frac{1}{1-\alpha+\frac{\alpha}{N}}$$

- Batas speedup yang mungkin diraih adalah

$$lim_{N \to \infty}(speedup) = \frac{1}{1-\alpha}$$

Contoh

- Sebuah program dijalankan pada komputer CPU tunggal menghabiskan waktu 10 menit. Setelah dianalisa, ternyata 60% bagian program tersebut dapat diparalelkan.
- Berapa waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan program tersebut pada komputer dengan 4 buah CPU?
- Berapa speedup yang diperoleh dan speedup maksimalnya?

Contoh

- T = 10 menit
- α = 60% = 0.6
- Dengan 4 buah CPU (N = 4)

$$tpar = (1-\alpha)T + \alpha T/N$$

$$= (1 – 0.6)*10 \text{ menit} + 0.6 * 10 \text{ menit} / 4$$

$$= 4 \text{ menit} + 1.5 \text{ menit}$$

$$= 5.5 \text{ menit}$$

Contoh

- Speedup yang didapat

  speedup = tseq/tpar

  = 10 menit / 5.5 menit

  = 1.82 kali

- Speedup maksimalnya

  speedupmax = 1 / (1-α)

  = 1 / (1 – 0.6)

  = 1 / 0.4

  = 2.5 kali

Kegagalan Amdahl Law

- Jika Amdahl Law benar, seharusnya berapa banyak CPU pun yang dikerahkan, maka speedup tidak akan banyak berubah (asimtotik)
- Tapi nyatanya ada super komputer yang terdiri dari banyak CPU yang performanya melebihi sebuah komputer CPU tunggal yang kuat
- Amdahl Law gagal untuk menjelaskan data empiris. Kenapa program paralel selalu melewati batas speedupnya.

Gustafson-Barsis Rebuttal

- Dua dekade setelah Amdahl Law dipublikasikan, Gustafson dan Barsis mengamati masalahnya dari sudut yang lebih tepat.
- Platform paralel lebih dari sekedar “mempercepat eksekusi program sekuensial”, tetapi mengakomodir masalah yang lebih besar.
- Jadi daripada melihat bagaimana program paralel melakukan sesuatu dibandingkan serialnya, kita seharusnya melihat bagaimana performa mesin sekuensial jika dia harus menyelesaikan masalah yang sama yang diselesaikan oleh mesin paralel.

Gustafson-Barsis Rebuttal

- Dengan mengasumsikan :
  - Ada aplikasi paralel yang membutuhkan waktu T untuk dieksekusi pada N buah CPU
  - Aplikasi ini menghabiskan sebanyak α bagian dari total waktunya secara paralel. Sisanya dikerjakan secara sekuensial
- Masalah yang sama dikerjakan pada mesin sekuensial akan membutuhkan waktu

$$t_{seq} = (1 - \alpha)T + N \cdot \alpha \cdot T$$

Gustafson-Barsis Rebuttal

- Speedup yang diperoleh sebesar

$$speedup = \frac{t_{seq}}{t_{par}} = \frac{(1-\alpha)T + N \cdot \alpha \cdot T}{T} = (1-\alpha) + N \cdot \alpha$$

- Dan efisiensinya

$$efficiency = \frac{speedup}{N} = \frac{1-\alpha}{N} + \alpha$$

Contoh

- Dengan data yang sama dengan contoh Amdahl Law, didapatkan
- Tseq = 15.4 menit
- Speedup = 2.8 kali
- Efisiensi = 0.7 = 70%

Observed Speedup

- waktu eksekusi program serial dan program paralel tersebut adalah waktu nyata (*wall clock time*)
- tidak objektif untuk digunakan sebagai perbandingan karena waktunya tergantung pada :
  - kemampuan programmer mengimplementasikan program
  - pemilihan jenis compiler
  - switch compiler (contoh : menyalakan optimisasi atau tidak)
  - sistem operasi
  - filesystem yang menyimpan input data (NTFS, EXT4, dll)
  - waktu eksekusi (workload, traffic, dll)

Parallel Overhead

- Waktu yang dibutuhkan oleh task paralel untuk berkoordinasi tanpa melakukan pekerjaan komputasi sesungguhnya :
  - task startup time
  - synchronization
  - data communication
  - software overhead
  - task termination time

Parallel Programming Model

- Parallel Programming Model muncul sebagai abstraksi dari hardware dan arsitektur memori
- Ada beberapa yang umum digunakan :
  - Shared Memory
  - Threads
  - Message Passing
  - Data Parallel
  - Hybrid

- Model-model tersebut bukan model yang spesifik digunakan untuk mesin tertentu atau arsitektur memori tertentu.
- Secara teoritis, model-model ini bisa diimplementasikan pada hardware apapun.

Model Shared Memory pada Mesin Distributed Memory

- Kendall Square Research (KSR) ALLCACHE
- Memori terdistribusi secara fisik, tapi user melihatnya seperti single shared memory (global memory)
- Disebut virtual shared memory / distributed shared memory

Model Message Passing pada Mesin Shared Memory

- SGI Origin menggunakan arsitektur shared memory CC-NUMA dimana setiap task punya akses ke global memory.
- komunikasi data yang umum digunakan pada mesin SGI Origin tersebut adalah MPI, dengan mengirim dan menerima pesan seperti yang biasa digunakan pada arsitektur distributed memory.

Model 1 : Shared Memory

- antar task yang satu dengan yang lain saling berbagi alamat memori bersama. dibaca dan ditulis secara asynchronous
- beberapa mekanisme seperti locks/semaphores dapat digunakan untuk mengontrol akses ke memori bersama
- tidak ada “data ownership” sehingga programmer tidak perlu menyatakan secara eksplisit komunikasi data antar task
- sulit memahami dan mengatur lokalitas data

Model 1 : Shared Memory

- Implementasi :
  - kompiler menerjemahkan variabel pada program yang dibuat ke dalam alamat memori sesungguhnya yang bersifat global

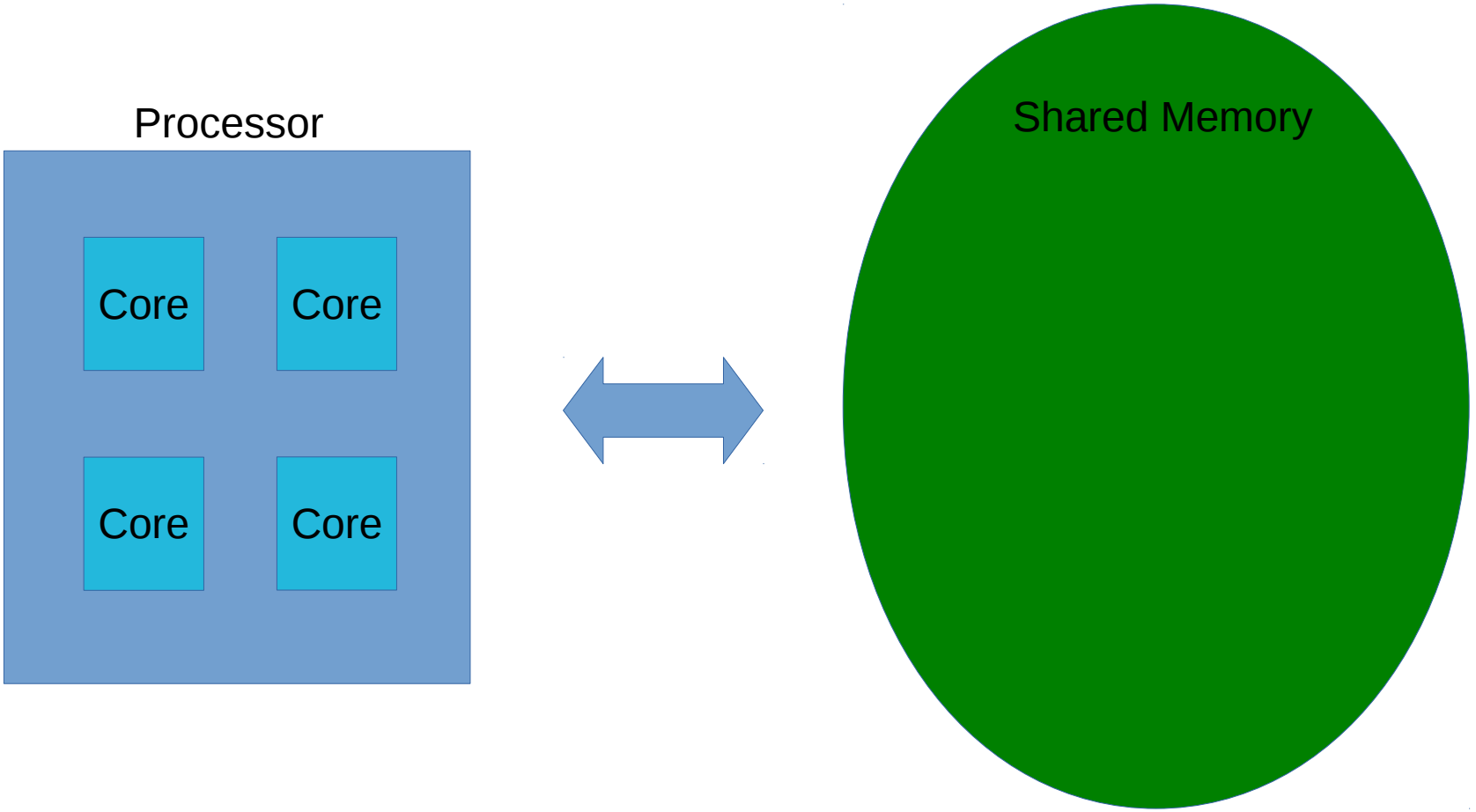
Model 2 : Threads

- sebuah proses dapat memiliki beberapa jalur eksekusi yang bersamaan (concurrent)
- main program dijalankan oleh OS secara serial.
- main program dapat menjalankan task (thread) yang terjadwal dan dijalankan oleh OS secara serentak
- setiap thread memiliki lokal data dan berbagi sumber daya bersama (shared memory)

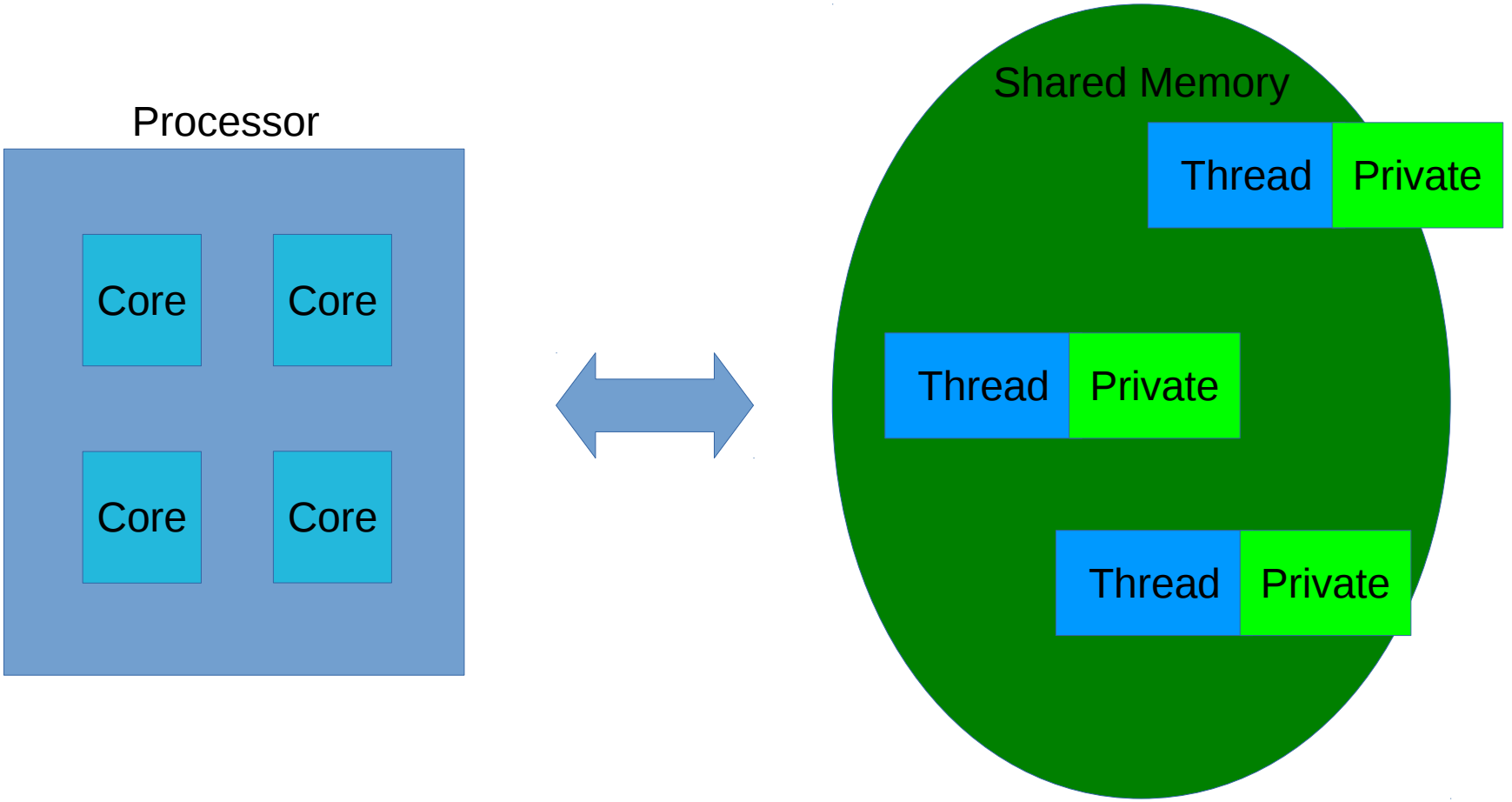
Model 2 : Threads

- thread berkomunikasi satu sama lain melalui global memory. karena itu dibutuhkan synchronization untuk memastikan tidak ada lebih dari satu thread yang mengupdate global memory pada satu waktu
- thread bisa dibuat dan dihancurkan, tapi main program tetap ada untuk menyediakan sumber daya bersama hingga program selesai dijalankan.

Threads



Threads


Processor
Core
Core
Core
Core
Shared Memory
Thread
Private
Thread
Private
Thread
Private

Model 2 : Threads

Implementasi :

- dari perspektif programming, implementasi thread terdiri dari
  - **library** yang dipanggil dari source code program paralel
  - sekumpulan **compiler directive** yang dimasukkan ke dalam source code program serial atau paralel
- pada keduanya, programmer bertanggung jawab untuk menentukan paralelisme yang dilakukan

Model 2 : Threads

- vendor hardware memiliki implementasi dari thread sendiri
- standardisasi implementasi tersebut mengerucut menjadi 2 macam implementasi threads :
  - POSIX Thread
  - OpenMP

POSIX Thread

- Berbasis library, koding paralel
- Bahasa C
- Dikenal sebagai pthreads
- Paralelisme eksplisit. membutuhkan kemampuan programmer untuk memperhatikan kode secara detail
- diatur dalam standard :
  IEEE POSIX 1003.1c standard (1995)

Open MP

- Berbasis compiler directive, bisa menggunakan program serial
- Bahasa Fortran, C, C++
- Portabel, multiplatform
- Mudah dan sederhana dalam penggunaannya

Model 3 : Message Passing

- Setiap task menggunakan memori lokal pada waktu melakukan komputasi
- Task satu dan yang lain bertukar data dengan mengirimkan dan menerima paket data
- Data transfer biasanya membutuhkan operasi kooperatif dari tiap proses. (operasi send harus memiliki pasangan operasi receive)

Model 3 : Message Passing

Implementasi :

- Menggunakan library yang dimasukkan ke dalam penulisan source code.
- Programmer bertanggung jawab untuk menentukan paralelisme
- Pada arsitektur shared memory, implementasi MPI tidak menggunakan jaringan untuk komunikasi antar task, tapi menggunakan shared memory (salinan) untuk meningkatkan performa

Model 4 : Data Parallel

- Task paralel fokus pada melakukan operasi di sekumpulan data. data umumnya disusun dalam bentuk array atau matriks
- Sejumlah task bekerja bersamaan pada struktur data yang sama, tapi pada bagian data yang berbeda
- Task melakukan operasi yang sama pada data yang mereka kerjakan.

Model 4 : Data Parallel

Implementasi :

- Pada shared memory, semua task memiliki akses ke struktur data melalui memori global.
- Pada distributed memory, data strukturnya dibagi-bagi menjadi bagian kecil bernama “chunk” yang dikirimkan ke memori lokal masing masing task.

Model 5 : Hybrid

- Dua atau lebih model programming paralel dikombinasikan
- Yang umum : MPI digabungkan dengan thread (pthread atau openmp)
- Model hibrid yang umum lainnya adalah MPI digabungkan dengan data parallel. Implementasi data parallel pada arsitektur distributed memory menggunakan message passing sebagai cara komunikasinya.

Model Lainnya

- Model programming paralel tidak terbatas pada kelima model tersebut, tapi masih berkembang terus mengikuti perkembangan hardware dan software

Paralelisasi Otomatis vs Manual

- Pada awalnya, mendesain program paralel sepenuhnya pekerjaan manual :
  - time consuming
  - complex
  - error prone
- Beberapa tools dikembangkan untuk membantu programmer mengubah program serial ke dalam bentuk paralel (parallelizing compiler / pre-processor)

Parallelizing Compiler

- Fully Automatic
  - compiler menganalisis kode dan menemukan potensi untuk paralelisasi
  - mengidentifikasi penghambat (inhibitor) paralelisme dan menghitung apakah paralelisasinya meningkatkan performa atau tidak
  - mentarget loop untuk paralelisasi
- Programmer Directed
  - menggunakan compiler directive atau flags untuk memberitahu compiler bagian yang harus diparalelkan

Kelemahan Paralelisasi Otomatis

- bisa jadi hasilnya salah
- performa program paralel yang dihasilkan bisa lebih rendah dari program serialnya
- tidak sefleksibel paralelisasi manual
- terbatas pada bagian tertentu dari kode (biasanya loop)
- bisa tidak menghasilkan kode paralel jika hasil analisisnya mengatakan ada inhibitor atau kodenya terlalu kompleks
- kebanyakan dikembangkan dalam bahasa fortran

Paralelisasi Manual

Langkah-langkah mengembangkan program paralel :

- Memahami masalah yang ingin dipecahkan dan program (kode) yang ada
- Menentukan apakah masalahnya bisa diparalelkan atau tidak
- Mengatur data akses, komunikasi, dan sinkronisasi
- Mengidentifikasi hotspot, bottleneck, dan inhibitor dari algoritma yang dibuat

* note : algoritma paralel bisa berbeda sama sekali dengan algoritma serial meski untuk memecahkan masalah yang sama.

Metode PCAM

- Dipopulerkan oleh Ian Foster (1995)
- Metodenya masih relevan sampai sekarang, termasuk untuk platform multicore
- 4 langkah untuk mendesain program paralel :
  - Partitioning
  - Communication
  - Agglomeration
  - Mapping

Partitioning

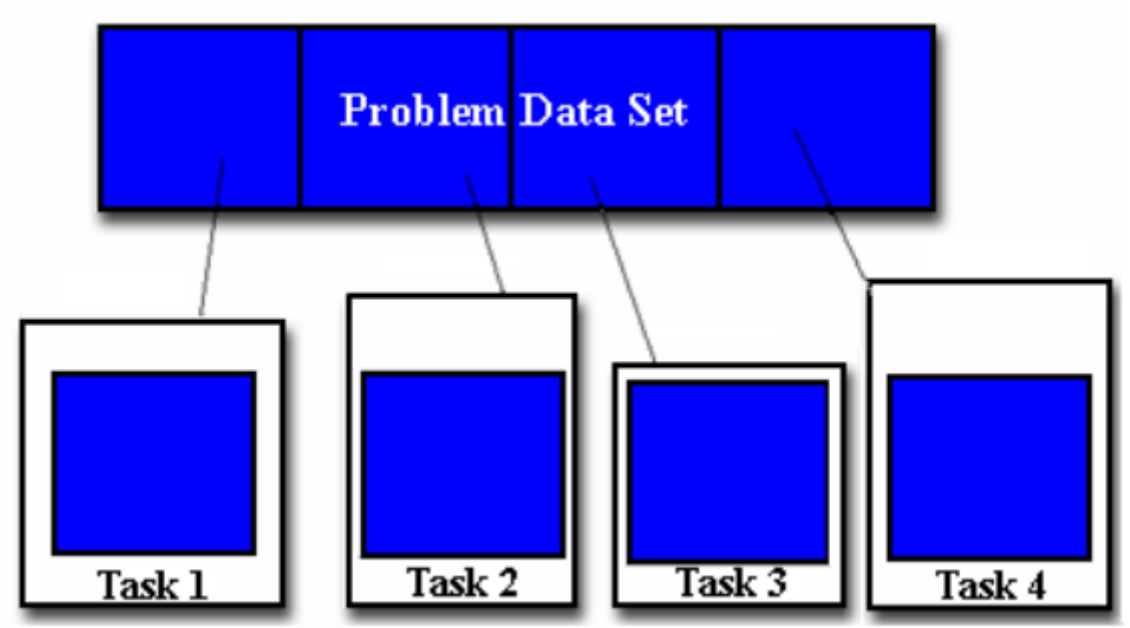
- Membagi masalah komputasi ke bagian-bagian kecil (task) yang bisa dikerjakan secara individu
- Tahap ini memunculkan paralelisme pada algoritmanya (jika ada)
- Pembagiannya bisa berdasarkan
  - data/domain decomposition
  - functional decomposition

Partitioning

- Tujuan tahap partitioning adalah untuk mengekspose kesempatan untuk melakukan eksekusi paralel
- Informasi praktis seperti “ada berapa prosesor yang akan digunakan” diabaikan dulu, masalah komputasi yang ada dibagi menjadi banyak task-task yang kecil (*fine grained decomposition of problems*)
- Kunci utama tahap partitioning adalah **mengindentifikasi dependensi**

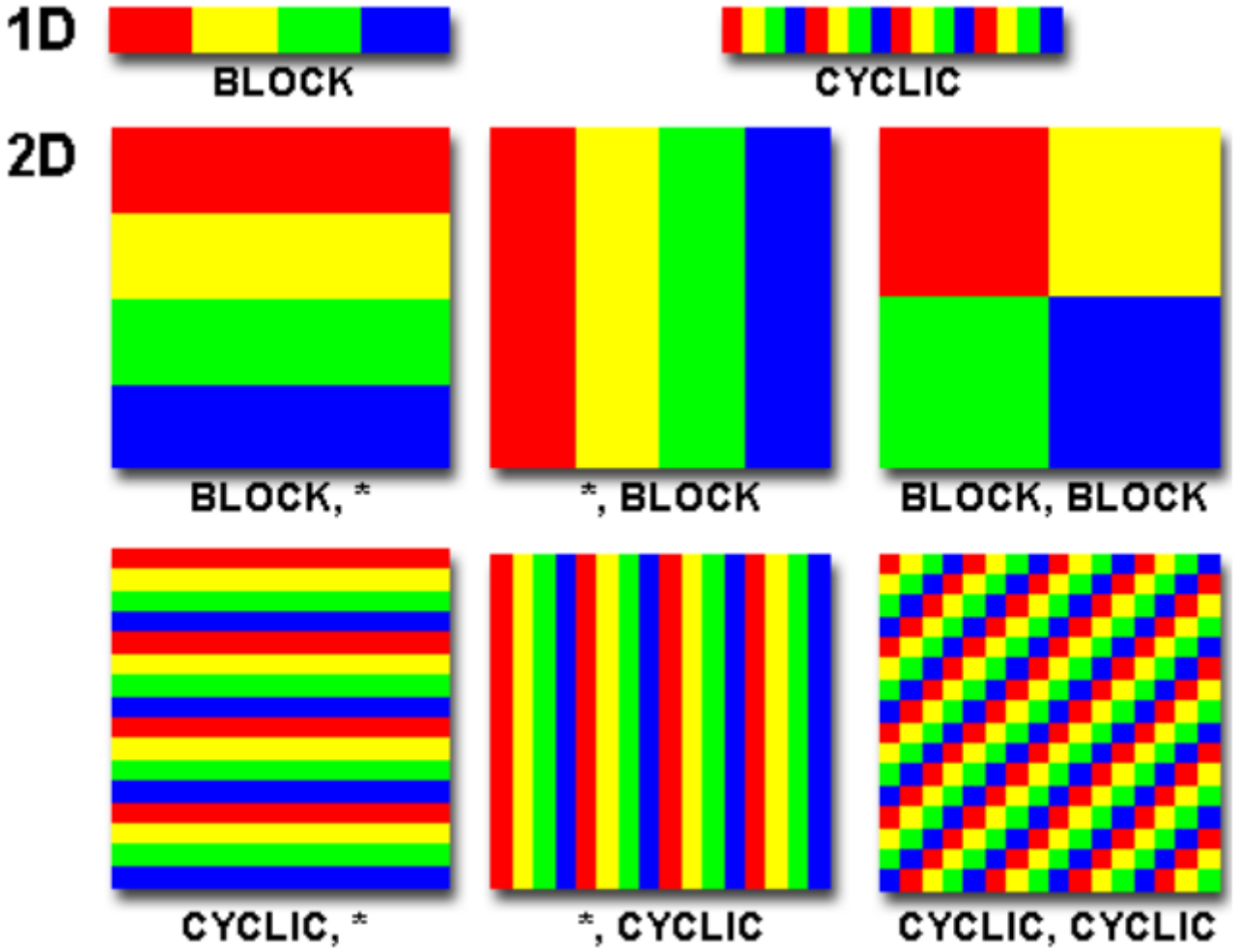
Domain Decomposition

- Data yang berkaitan dengan masalah yang ingin diselesaikan dipecah menjadi beberapa bagian



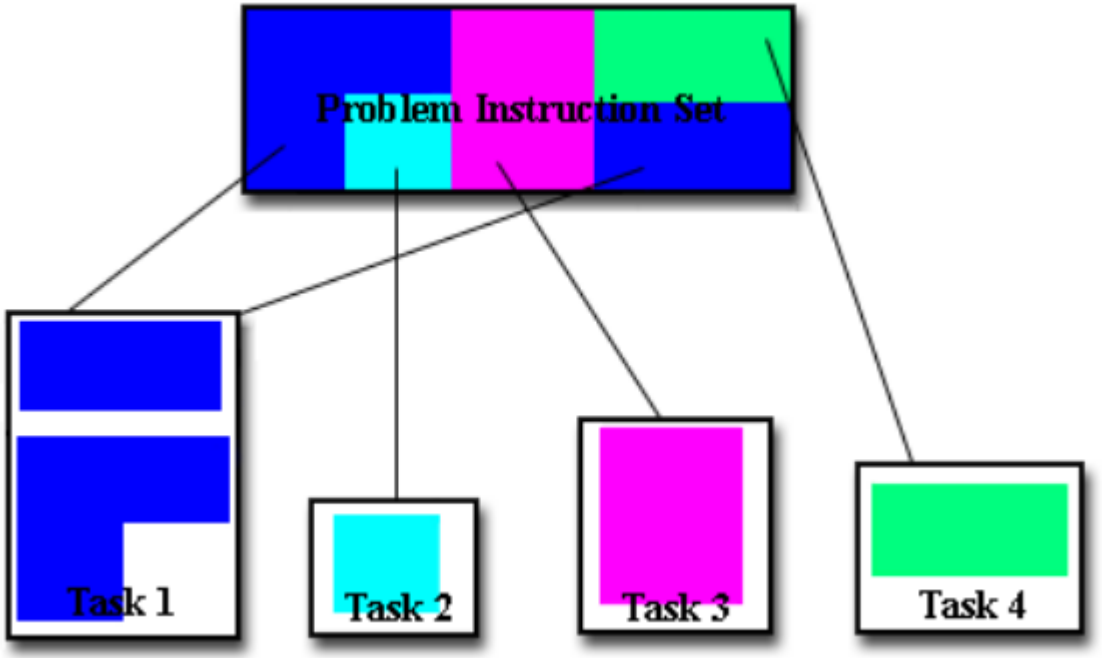
Domain Decomposition

- Beberapa cara untuk mempartisi data



Functional Decomposition

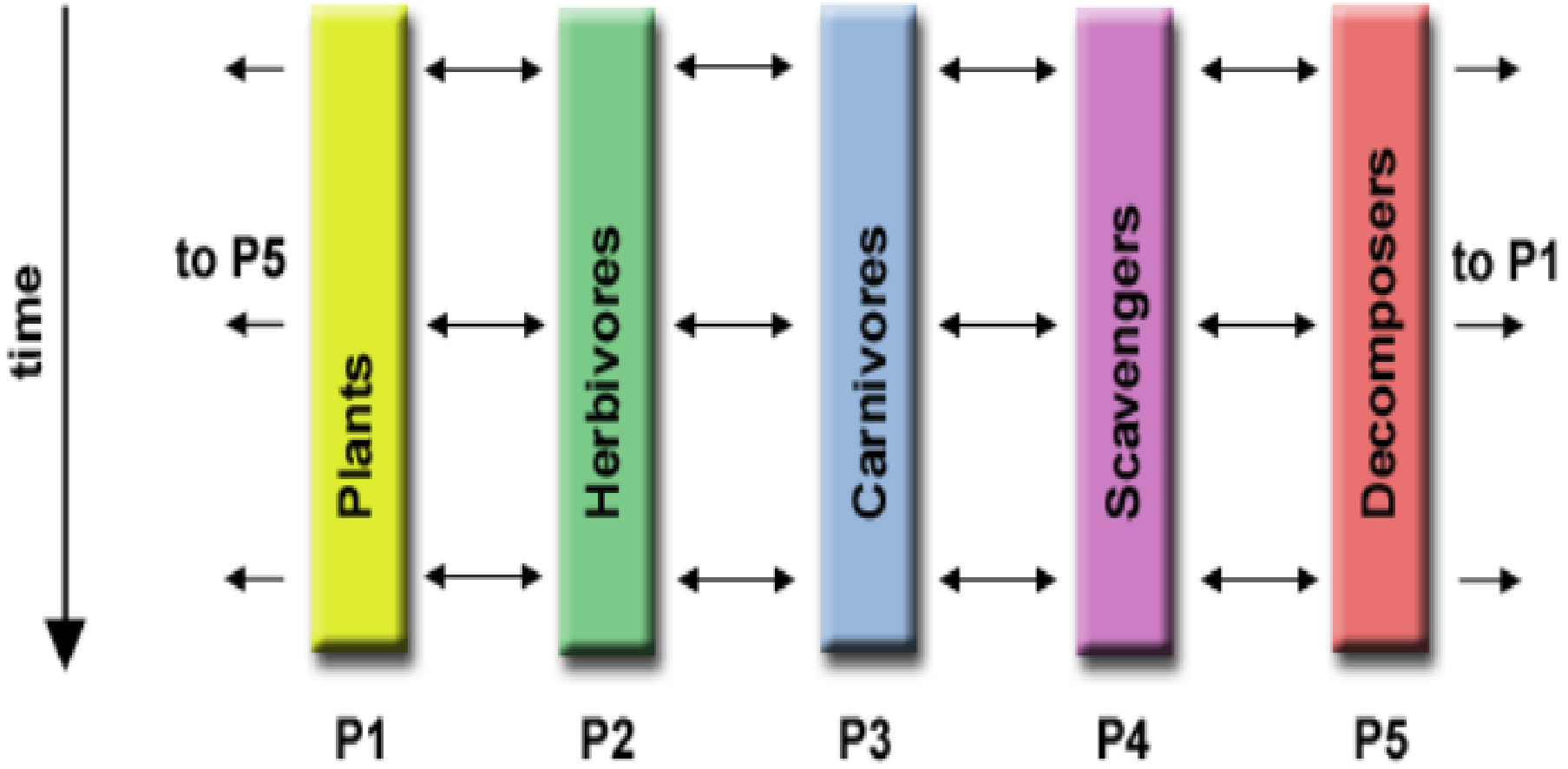
- Komputasi yang harus dilakukan dibagi menjadi beberapa bagian. Masalah dibagi berdasarkan pekerjaan yang harus diselesaikan. Setiap task melakukan bagian dari pekerjaan keseluruhan.



Contoh : Modeling Ekosistem

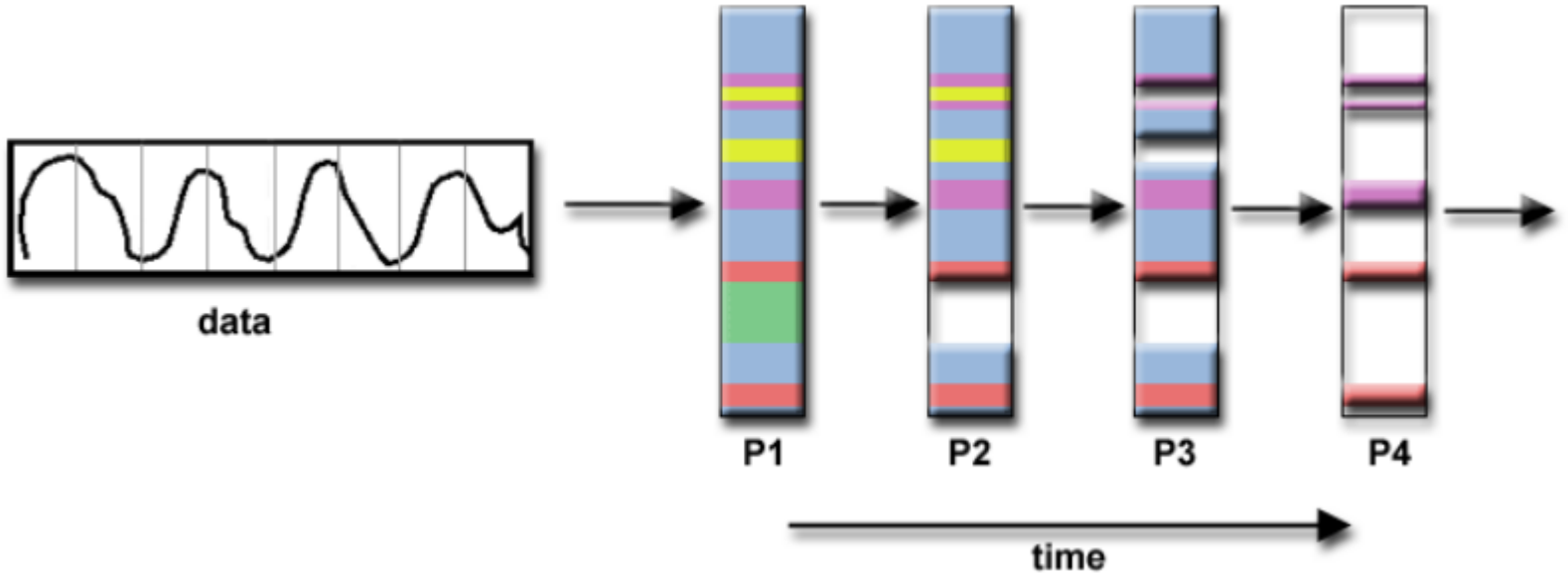
- Setiap program menghitung populasi dari sebuah grup
- Setiap grup berkembang tergantung grup tetangganya (prey - predator)
- Pada tiap langkah, masing masing proses menghitung kondisi terkini, mengkomunikasikan informasinya dengan grup tetangganya, dan menghitung kondisi pada langkah selanjutnya.

Contoh : Modeling Ekosistem



Contoh : Filter pada Sinyal Audio

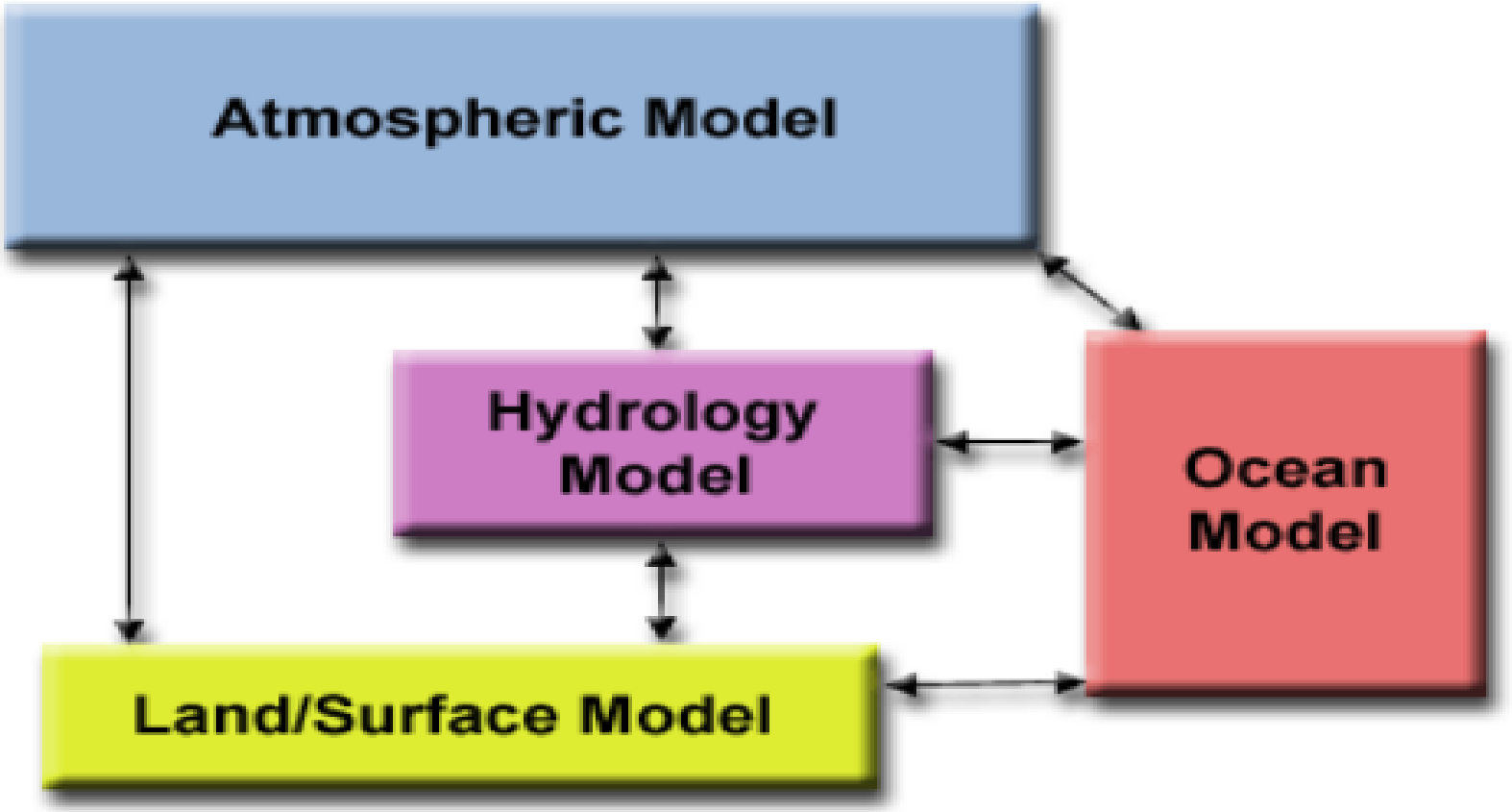
- Sinyal audio diproses melalui 4 buah filter yang merupakan proses terpisah. Prosesnya bertahap, sinyal harus melalui filter pertama sebelum masuk ke filter kedua. Pada saat data keempat masuk ke filter pertama, semua task bekerja



Contoh : Modeling Iklim

- Setiap komponen iklim dapat dipandang sebagai task yang berbeda
- Model atmosfer menghasilkan data kecepatan angin yang digunakan oleh model samudra. model samudra menghasilkan data suhu permukaan laut yang digunakan oleh model atmosfer
- Atmosfer menghasilkan data kelembaban udara yang digunakan oleh model hidrologi, dst.

Contoh : Modeling Iklim



Tugas

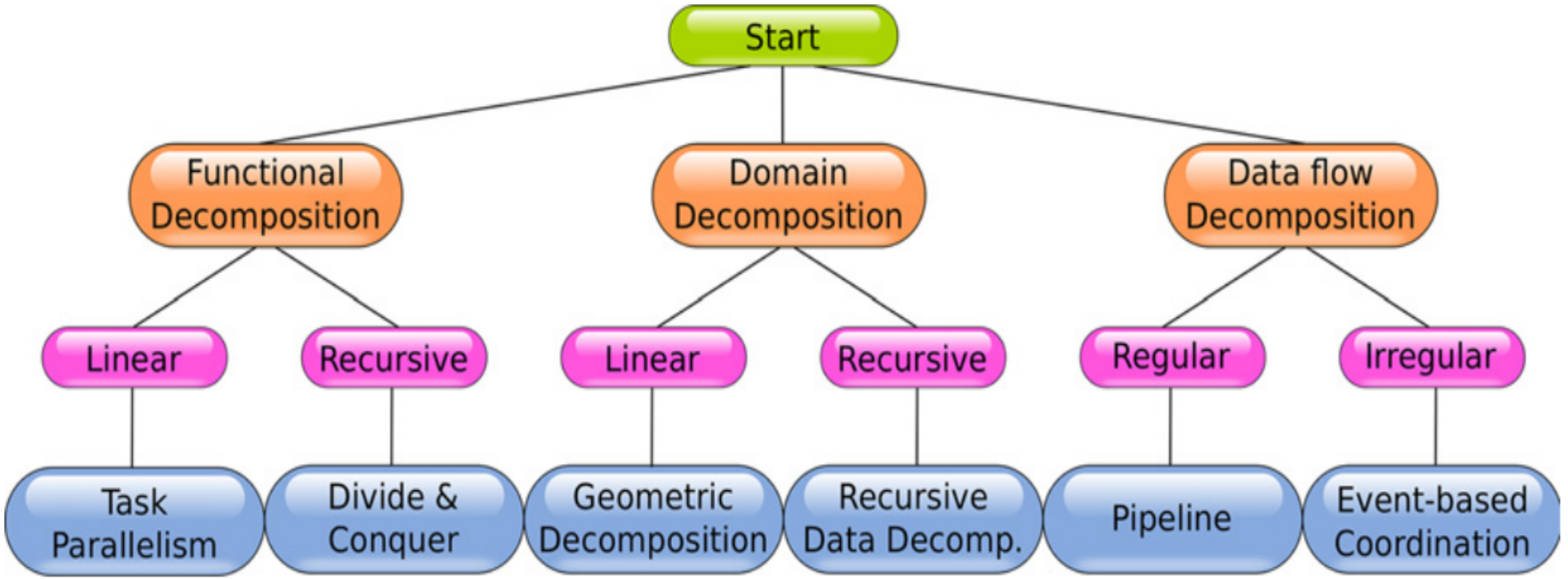
- Cari sebuah masalah dunia nyata yang dapat diparalelkan
- Bagi menjadi bagian bagian kecil
- Tentukan apakah itu domain/functional decomposition
- Cari sebuah algoritma/kode. pelajari kegunaan dan cara kerja algoritma tersebut.

Data Flow Decomposition

- Selain data/domain decomposition dan functional decomposition, ada satu cara lagi untuk mempartisi sebuah program.
- Kategori ini bisa diterapkan jika aplikasi digunakan untuk memproses data steam melalui beberapa tahap pemrosesan.
- Bisa dianggap sebagai ekstensi dari functional decomposition.
- Data stream bisa bertipe reguler ataupun ireguler

Pola Dekomposisi Algoritma

- Decission Tree untuk mendekomposisikan algoritma



Communication

- Pembagian data pada partitioning idealnya menyebabkan data saling independen.
- Tapi biasanya ada interdependensi antar task
- Volume data harus dikomunikasikan antar task yang interdependen ditentukan pada tahap ini
- Hasil dari tahap partitioning dan communication adalah **Task Dependency Graph**
  - Node = task
  - Edge = volume komunikasi

Agglomeration

- Mengurangi komunikasi antar prosesor
- Mengelompokkan task yang keterikatan datanya besar dalam sebuah grup
- Banyak grup yang dibuat sebaiknya setingkat di atas banyaknya node.

Mapping

- Grup yang sudah dibuat, diassign (map) ke dalam sebuah node komputasi (proses)
- Tujuannya :
  - load balance
  - mengurangi overhead komunikasi dengan memetakan grup dengan komunikasi besar ke dalam node yang sama
- Mapping dari proses ke prosesor diserahkan kepada OS, Compiler, atau Hardware

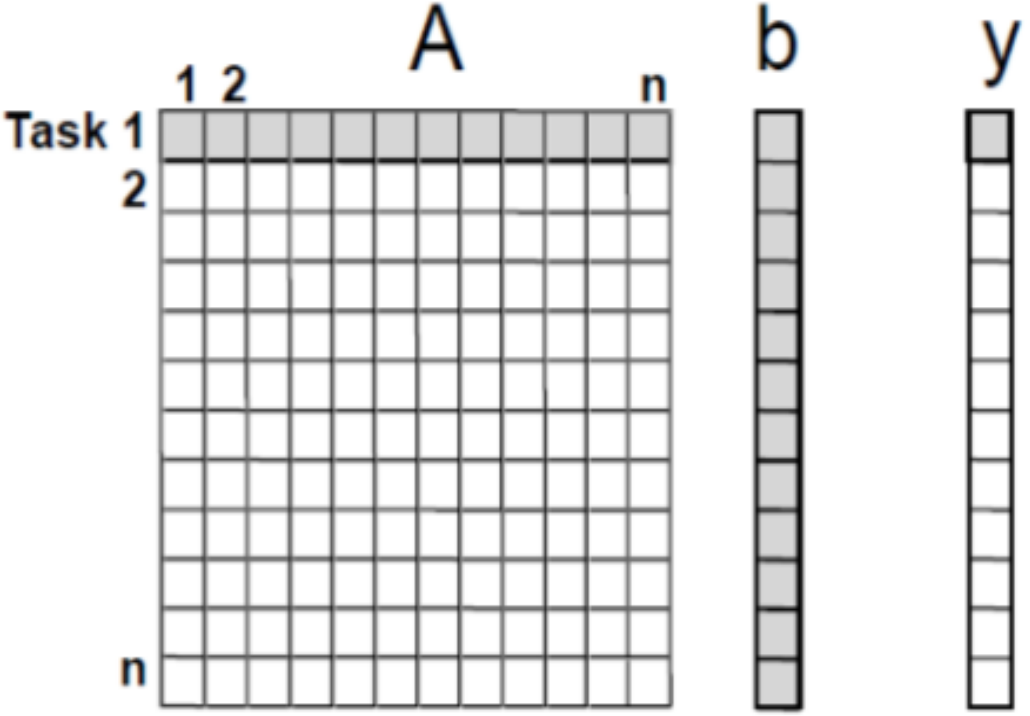
Mapping

- Meletakkan grup yang berkaitan (*cooperating threads*) dalam prosesor yang sama akan memaksimalkan lokalitas, data sharing, serta meminimalkan biaya komunikasi dan singkronisasi
- Meletakkan grup yang tidak berkaitan pada prosesor yang sama untuk menggunakan mesin lebih efisien

Contoh : Perkalian Matriks - Vektor

A * b = y

- A dan b adalah matriks dan vektor yang padat (dense)



Contoh : Perkalian Matriks - Vektor

- Problem : menghitung vektor **y** = **A** * **b**
- Task :
  - menghitung **y**[i] hanya membutuhkan baris ke-i dari **A** dan vektor **b**
  - menghitung **y**[i] dapat dianggap sebagai task
- Catatan :
  - ukuran task seragam
  - tidak ada ketergantungan antar task satu dan yang lainnya
  - semua task butuh b

Contoh : Perkalian Matriks - Vektor

- Misal n = 2 , kita memiliki problem berikut

a11	a12	x	b1	=	y1
a21	a22		b2		y2

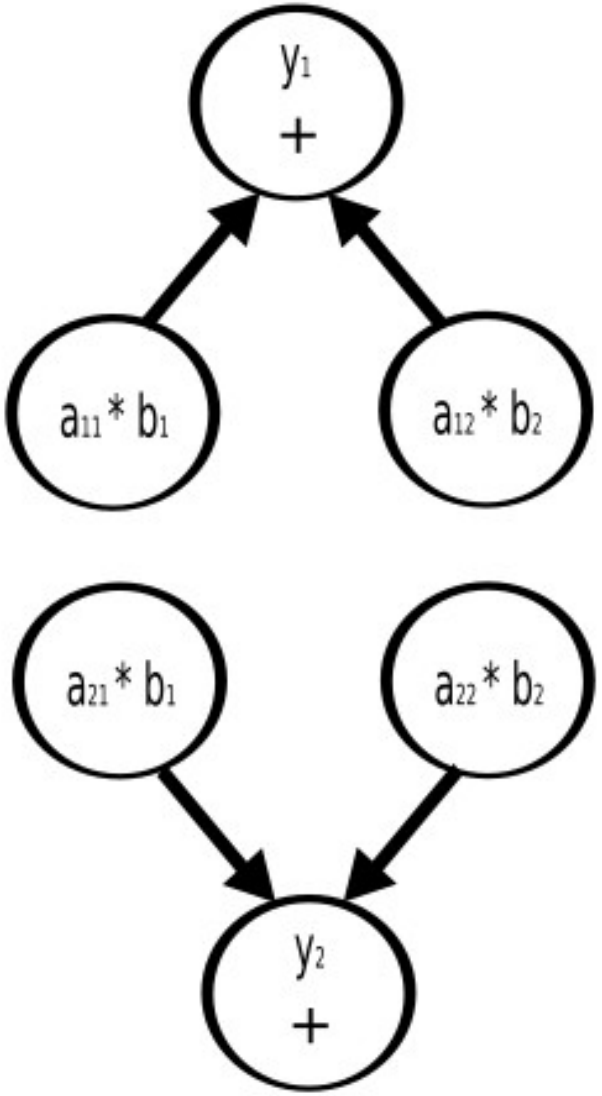
y1 = a11*b1 + a12*b2

y2 = a21*b1 + a22*b2

- Partitioning
  - Problem di atas dapat dibagi sekecil-kecilnya menjadi 8 bagian, yaitu tiap data berdiri sendiri (data decomposition)
  - Atau maksimal menjadi 6 kalkulasi (functional decomposition)

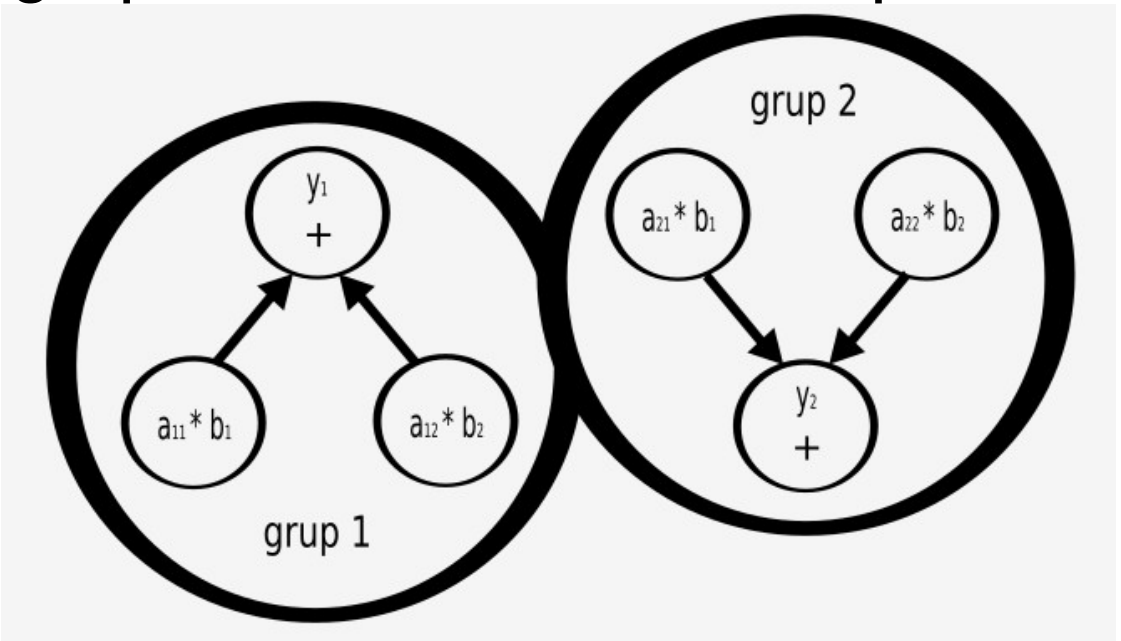
Contoh : Perkalian Matriks - Vektor

- Communication
  - Jika kita membagi problem tersebut berdasarkan datanya akan dibahas belakangan (*task interaction graph*)
  - Jika kita membagi problem tersebut menjadi 6 task dengan functional decomposition, maka didapat task dependency graph berikut



Contoh : Perkalian Matriks - Vektor

- Agglomeration
  - Untuk kasus ini, terlihat jelas keterkaitan dari task yang ada sehingga kita bisa buat jadi 2 grup
- Mapping
  - Tiap grup task dialokasikan ke proses



Contoh : Perkalian Matriks - Vektor

- Tidak ada communication antar task (*embarrasingly parallel*)
- **Embarassingly parallel / perfectly parallel** = masalah komputasi paralel dimana usaha untuk membagi masalah menjadi task parallel sangat sederhana. Biasanya antar task membutuhkan sedikit komunikasi atau tidak sama sekali.

Contoh : Database Query

- query : Model = “Civic” **and** Year = “2001” **and** (Color = “Green” **or** Color = “White”)

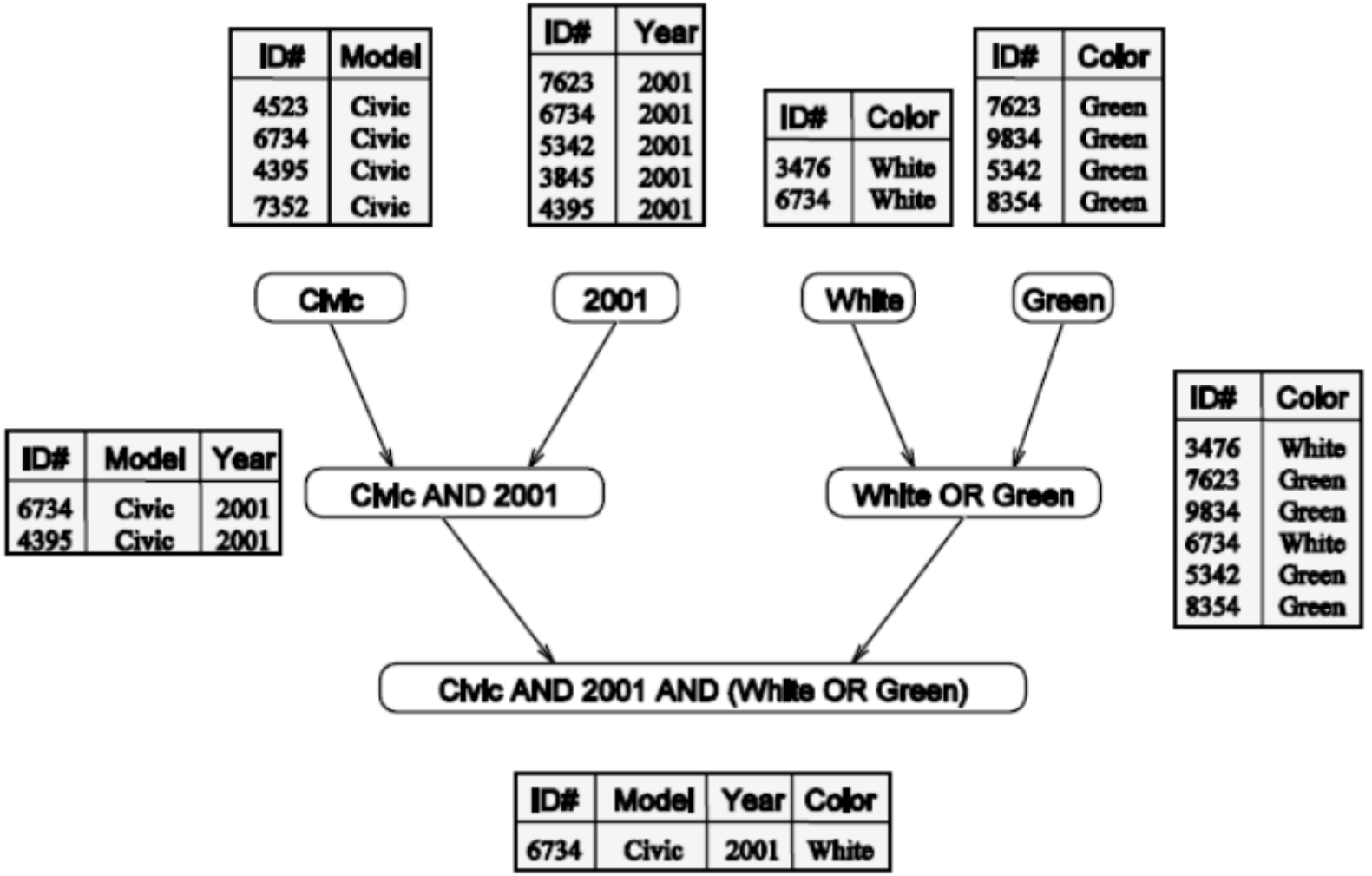
ID#	Model	Year	Color	Dealer	Price
4523	Civic	2002	Blue	MN	$18,000
3476	Corolla	1999	White	IL	$15,000
7623	Camry	2001	Green	NY	$21,000
9834	Prius	2001	Green	CA	$18,000
6734	Civic	2001	White	OR	$17,000
5342	Altima	2001	Green	FL	$19,000
3845	Maxima	2001	Blue	NY	$22,000
8354	Accord	2000	Green	VT	$18,000
4395	Civic	2001	Red	CA	$17,000
7352	Civic	2002	Red	WA	$18,000

Contoh : Database Query

- Problem : mencari data (row) yang memenuhi **semua** kriteria pada query
- Task :
  - sejumlah elemen yang memenuhi kriteria tertentu
- Task Dependency Graph
  - Node = task
  - Edge = output dari task yang satu jadi input dari task yang lain

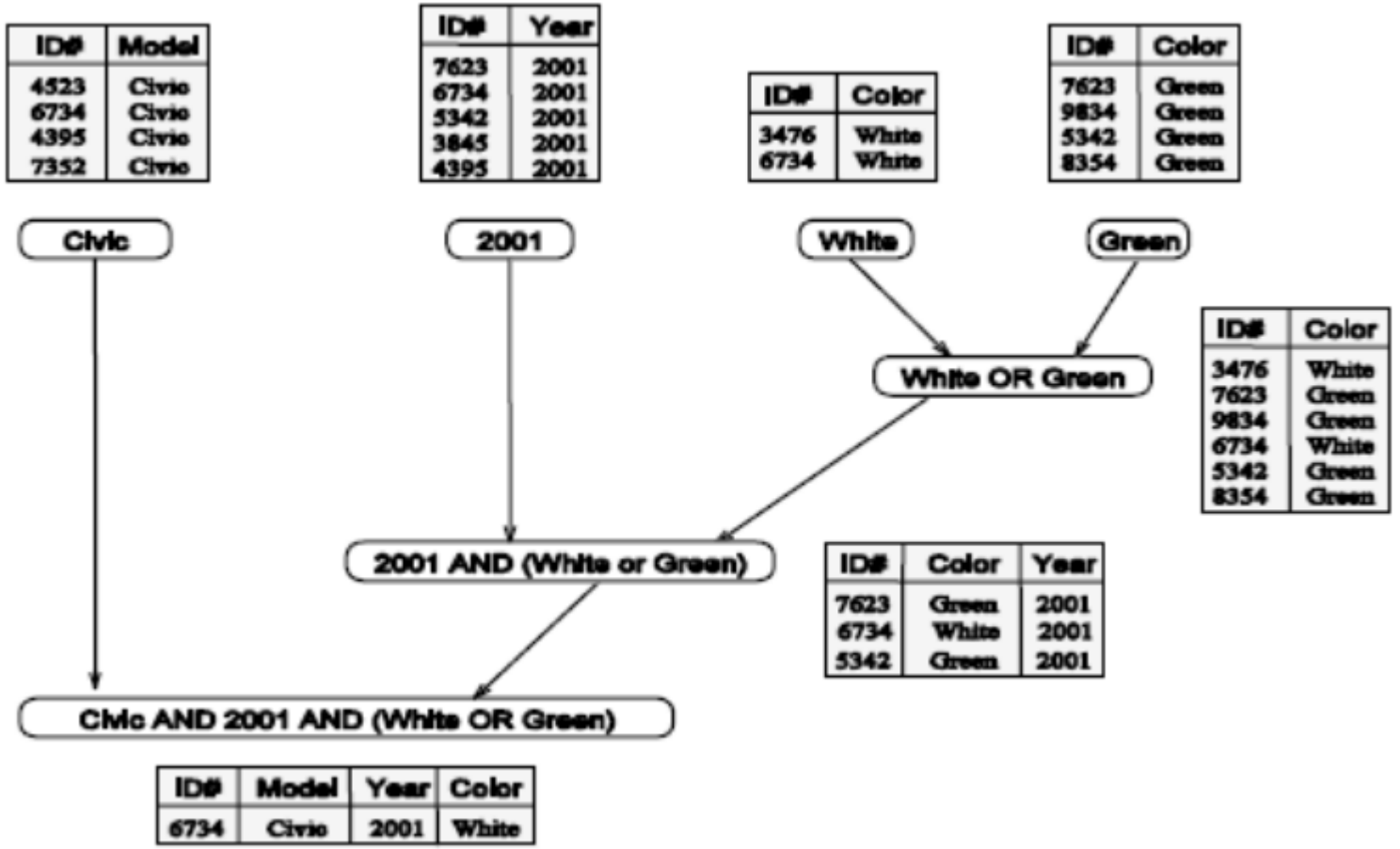
Task Dependency Graph

A = (p **and** q) **and** (r **or** s)



Task Dependency Graph

B = p **and** (q **and** (r **or** s))



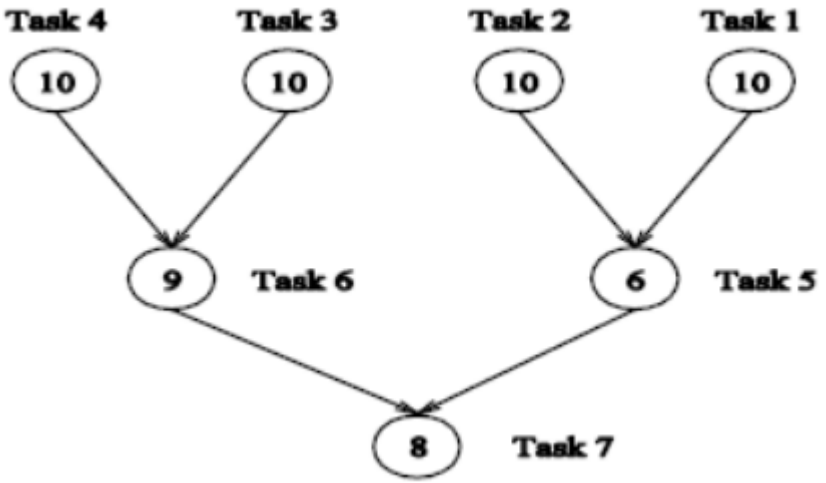
Derajat Keserentakan

- *Degree of Concurency* = Banyaknya task yang bisa dieksekusi secara paralel
  - maximum degree of concurency = banyak task serentak yang paling besar pada bagian manapun dari eksekusi
  - average degree of concurency = rata-rata dari banyaknya task yang bisa dieksekusi secara paralel
- **Derajat keserentakan** berbanding terbalik dengan **granularitas task**

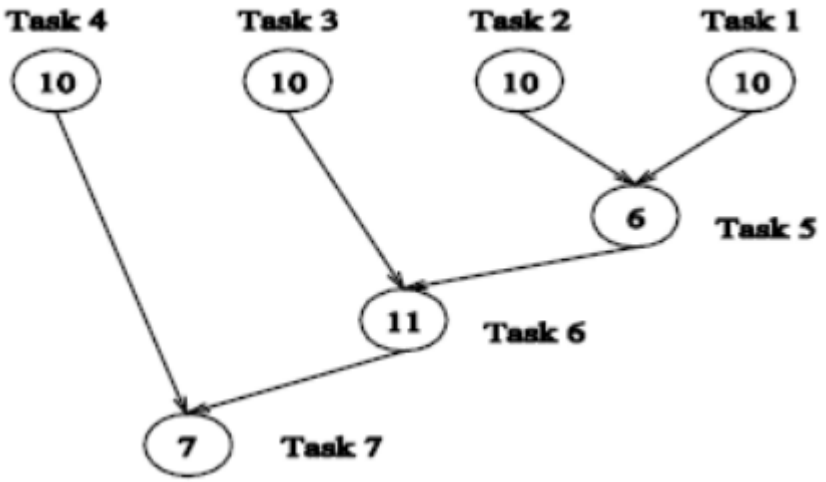
Critical Path

- *Critical Path* = path terpanjang dari node awal (node tanpa edge masuk) dan node akhir (node tanpa edge keluar)
- Critical Path Length = jumlah beban maksimal tiap node pada critical path
- average degree of concurrency =

$$\frac{\text{total amount of work}}{\text{critical path lenght}}$$



Graf A



Graf B

- Critical path length =

  27 **34**

- Average degree of concurrency =

  63/27 = **2,33** 64/34 = **1,88**

Task Interaction Graph

- Antar task biasanya berkomunikasi input, output, atau data yang diprosesnya.
- Task Interaction Graph
  - Node = task
  - Edge = interaksi / pertukaran data
- Task Dependency vs Task Interaction
  - Task dependency graph merepresentasikan keterkaitan **kontrol** antar task
  - Task interaction graph merepresentasikan keterkaitan **data** antar task

Contoh : Perkalian Matriks Jarang (Sparse Matrix)

- baris ke-i dari matriks **A** dan elemen **b**[i] diassign ke task ke-i
- setiap task menghitung elemen **y** (task ke-i menghitung **y**[i])