



COMPUTER ENGINEERING

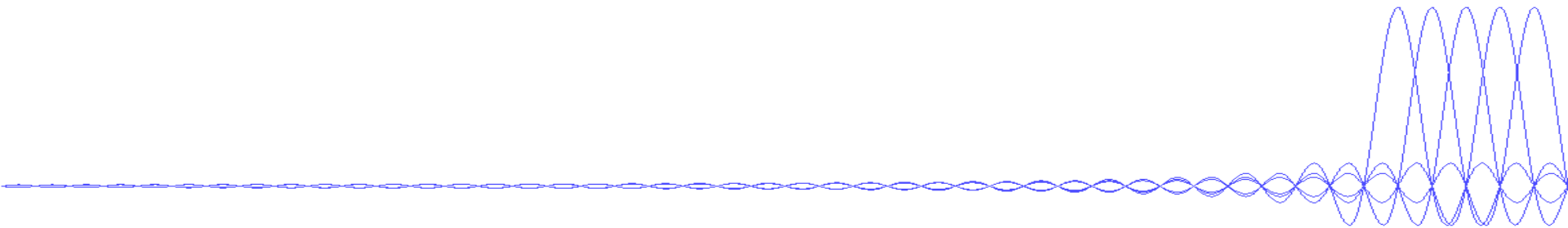
KIẾN TRÚC MÁY TÍNH



UIT
TRƯỜNG ĐẠI HỌC
CÔNG NGHỆ THÔNG TIN

Tuần 13

Kỹ thuật ống dẫn (Pipeline)

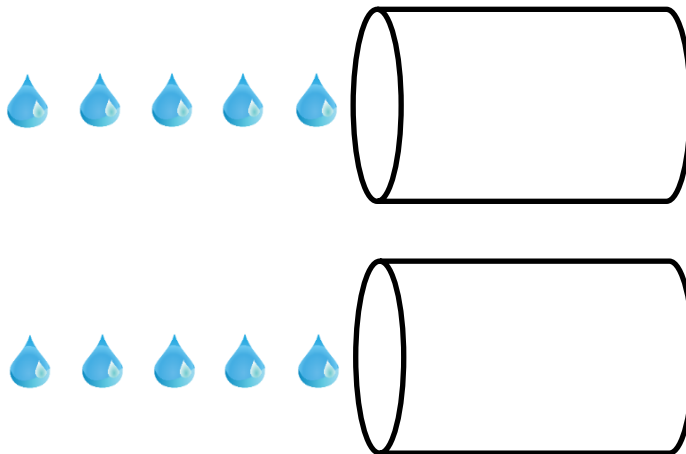


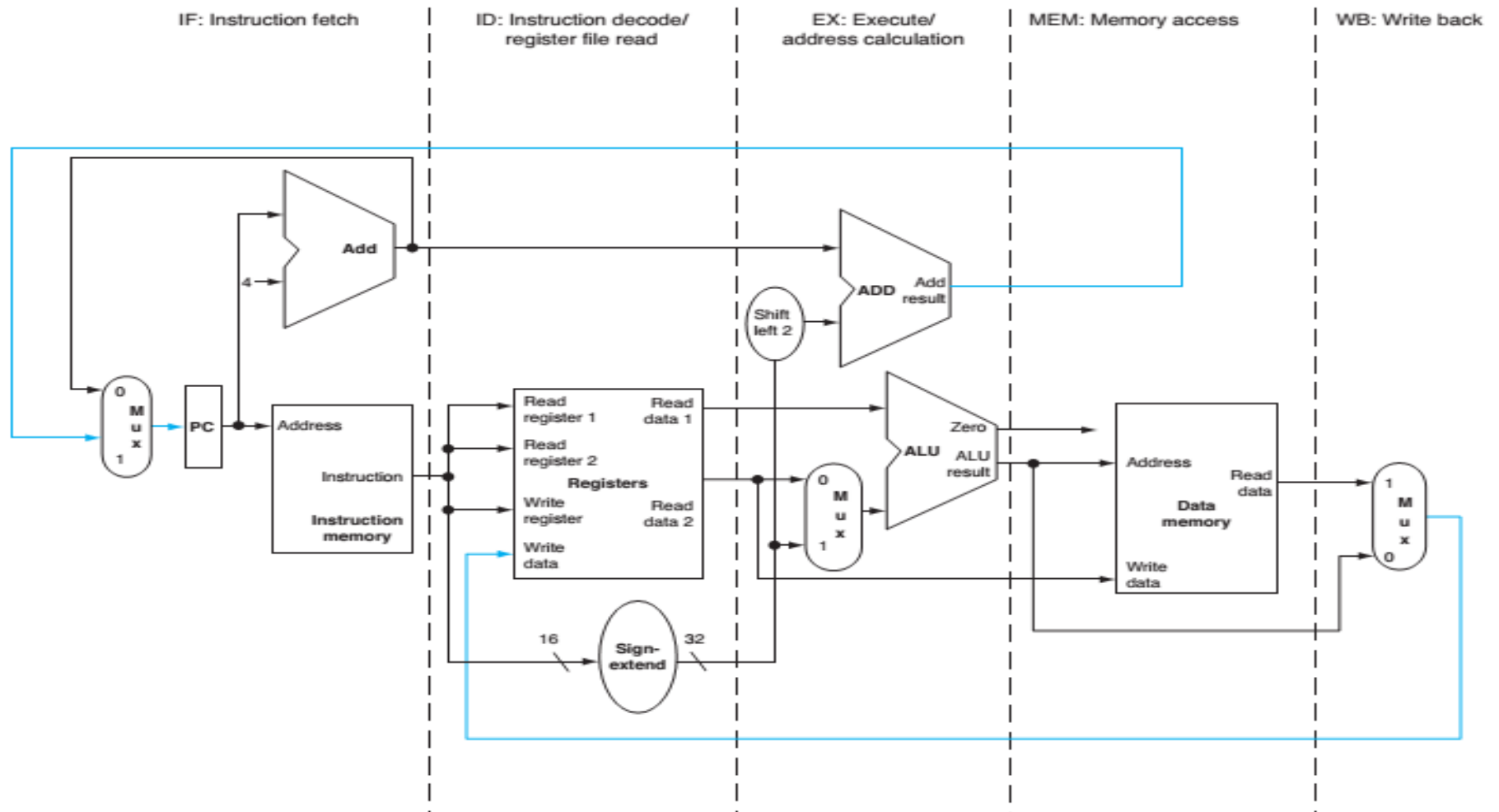


Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

■ Pipeline

- Là kỹ thuật mà các công việc tiếp theo được thực hiện khi công việc hiện tại chưa hoàn tất nhằm tận dụng tối đa tài nguyên thiết bị để tăng hiệu suất công việc





1. Nạp lệnh từ bộ nhớ – **IF**
2. Giải mã lệnh và đọc các thanh ghi – **ID**
3. Thực thi – **EX**
4. Truy xuất bộ nhớ – **MEM**
5. Ghi kết quả vào thanh ghi – **WB**



Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

Mục đích:

- ✓ Tổng quan về kỹ thuật Pipeline
- ✓ Những vấn đề phát sinh và hướng giải quyết trong pipeline

Slide được dịch và các hình được lấy từ sách tham khảo:

Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface,
Patterson, D. A., and J. L. Hennessy, Morgan Kaufman, Revised Fourth
Edition, 2011.



Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

❖ Trong kiến trúc máy tính, “**Pipeline**” là một kỹ thuật mà trong đó các lệnh được thực thi theo kiểu chồng lấn lên nhau (overlap).

❖ Ví dụ minh họa hoạt động như thế nào là **không pipeline** hay **pipeline**:

Giả sử một phòng có nhiều người, mỗi người đều cần giặt quần áo bẩn của mình. Quá trình giặt quần áo bao gồm 4 công đoạn:

1. Đặt quần áo bẩn vào máy giặt để giặt
2. Khi máy giặt hoàn thành, đưa quần áo ướt vào máy sấy
3. Khi máy sấy hoàn thành, đặt quần áo khô lên bàn và ủi
4. Khi ủi hoàn tất, xếp quần áo vào tủ

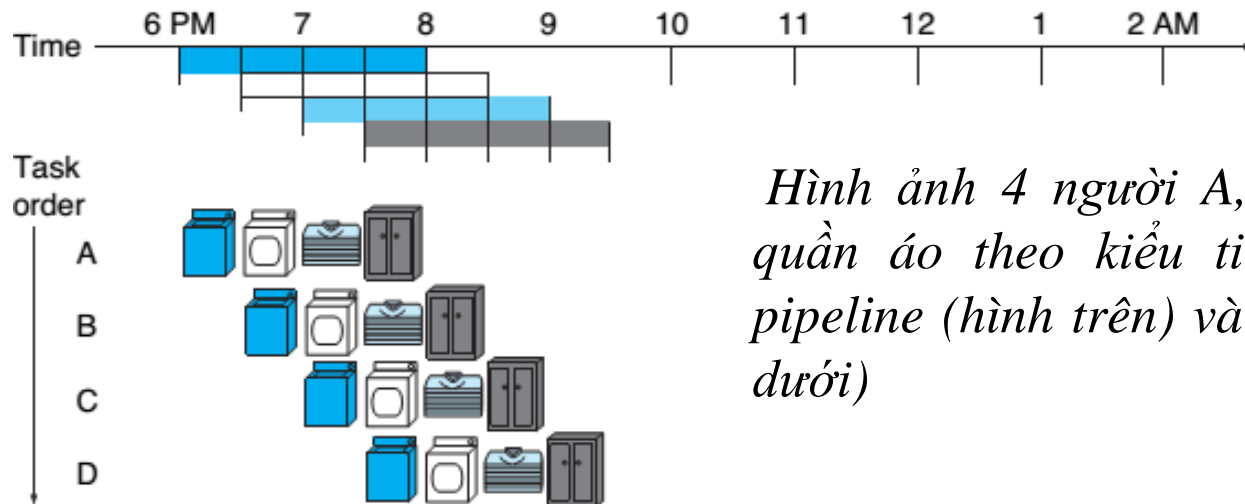
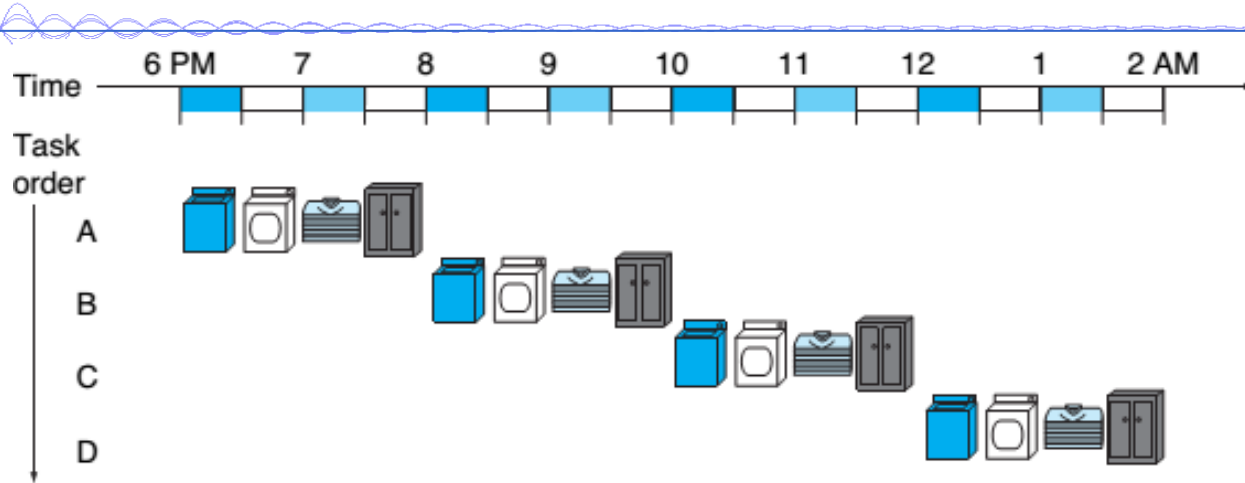


Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

- ✓ Nếu một người hoàn tất tất cả các công đoạn giặt quần áo (xong công đoạn sấy, ủi, xếp quần áo vào tủ) thì người khác mới bắt đầu (bắt đầu đặt quần áo bẩn vào máy giặt), quá trình thực hiện này gọi là **không pipeline**.
- ✓ Tuy nhiên, rõ ràng rằng khi người trước hoàn thành công đoạn 1, sang công đoạn 2 thì máy giặt đã trống, lúc này người tiếp theo có thể đưa quần áo bẩn vào giặt. Như vậy, người tiếp theo không cần phải chờ người trước xong công đoạn thứ 4 mới có thể bắt đầu, mà ngay khi người trước đến công đoạn thứ 2 thì người tiếp theo đã có thể bắt đầu công đoạn thứ nhất và cứ tiếp tục như vậy. Quá trình thực hiện chồng lấn này gọi là **pipeline**.



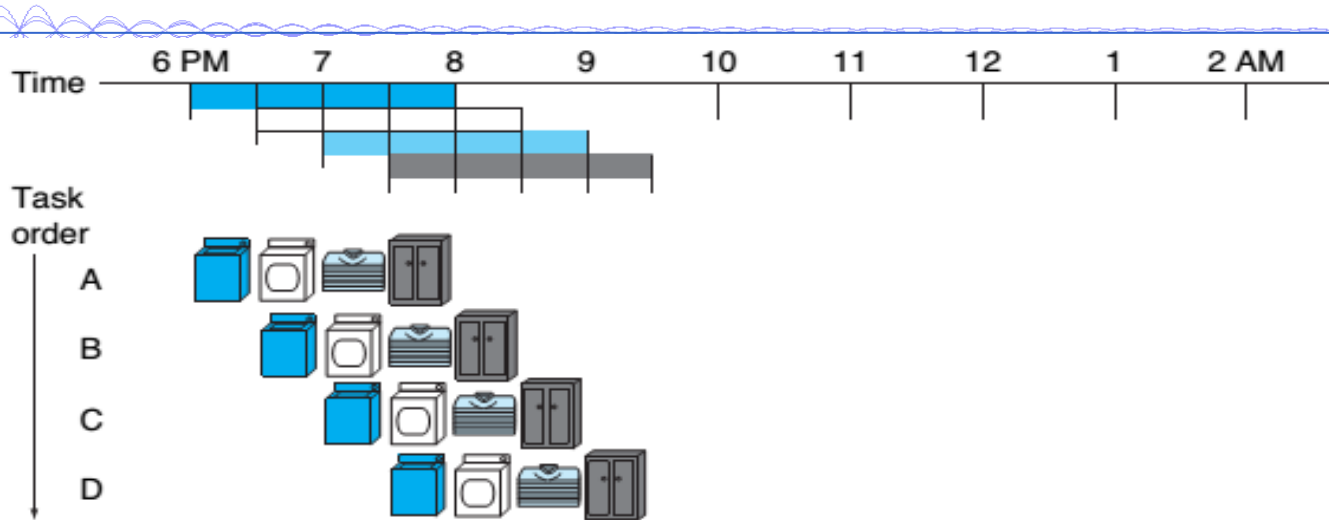
Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)



Hình ảnh 4 người A, B, C, D giặt quần áo theo kiểu tiếp cận không pipeline (hình trên) và pipeline (hình dưới)



Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)



- ✓ Cách tiếp cận dùng kỹ thuật pipeline tiêu tốn ít thời gian hơn để hoàn thành tất cả các công việc bởi vì các công việc được thực hiện song song - chồng lấn, vì vậy số công việc hoàn thành trong một giờ sẽ nhiều hơn so với không pipeline.
- ✓ Chú ý, pipeline không làm giảm thời gian hoàn thành một công việc mà làm giảm thời gian hoàn thành tổng số công việc (như trong ví dụ trên, thời gian cho người A hoàn thành việc giặt khi áp dụng pipeline hay không pipeline đều là 2 giờ, nhưng tổng số giờ cho 4 người A, B, C và D hoàn thành dùng pipeline giảm rất nhiều so với không pipeline)



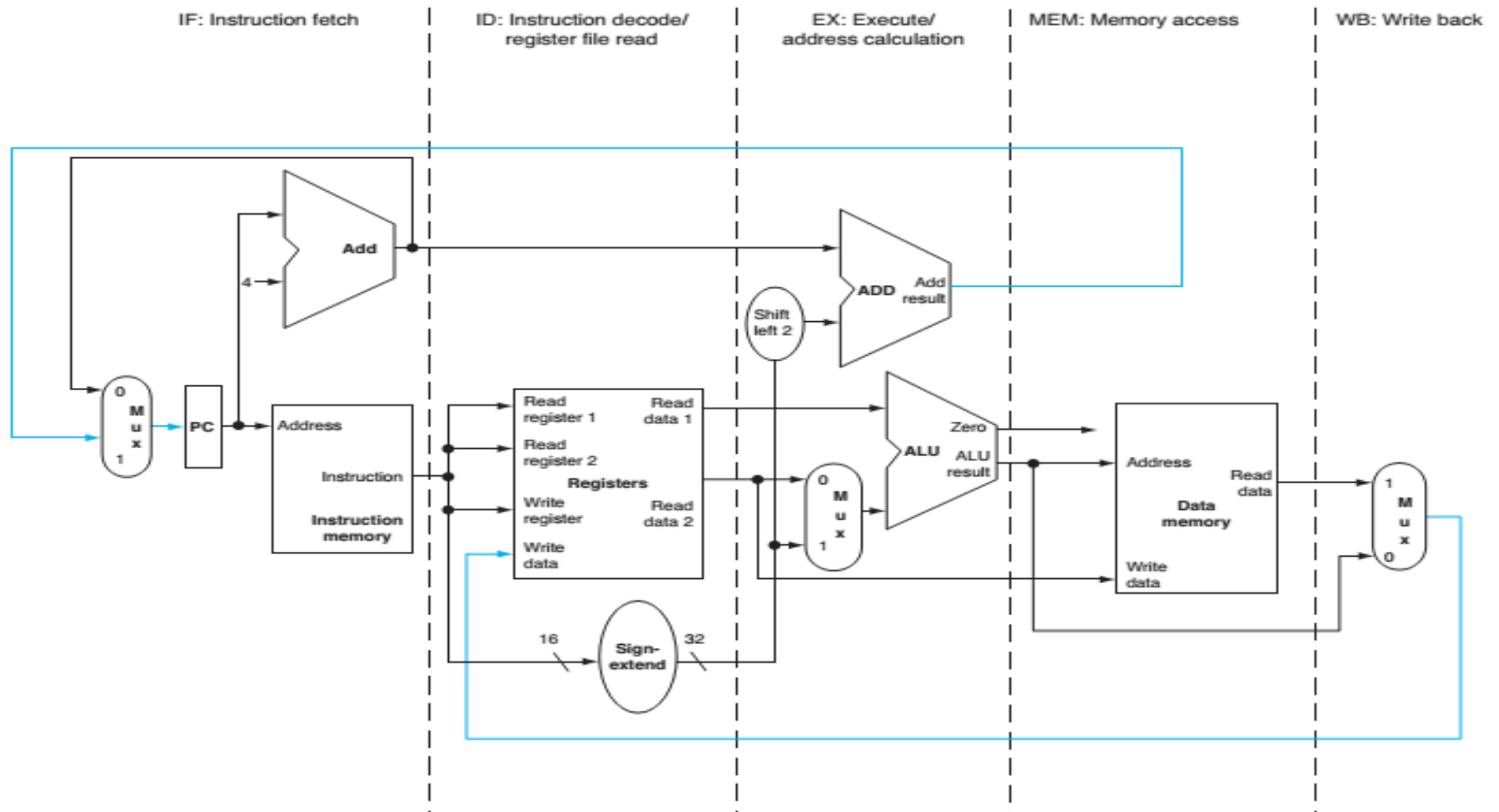
Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

Tương tự việc giặt quần áo, thay vì một lệnh phải chờ lệnh trước đó hoàn thành mới được thực thi thì các lệnh trong một chương trình của bộ xử lý có thể thực thi theo kiểu pipeline.

Khi thực thi, các lệnh MIPS được chia làm 5 công đoạn:

- 1. Nạp lệnh từ bộ nhớ**
- 2. Giải mã lệnh và đọc các thanh ghi cần thiết (MIPS cho phép đọc và giải mã đồng thời)**
- 3. Thực thi các phép tính hoặc tính toán địa chỉ**
- 4. Truy xuất các toán hạng trong bộ nhớ**
- 5. Ghi kết quả cuối vào thanh ghi**

Vì vậy, MIPS pipeline trong chương này xem như có 5 công đoạn (còn gọi là pipeline 5 tầng)



1. Nạp lệnh từ bộ nhớ – **IF**
2. Giải mã lệnh và đọc các thanh ghi – **ID**
3. Thực thi – **EX**
4. Truy xuất bộ nhớ – **MEM**
5. Ghi kết quả vào thanh ghi – **WB**



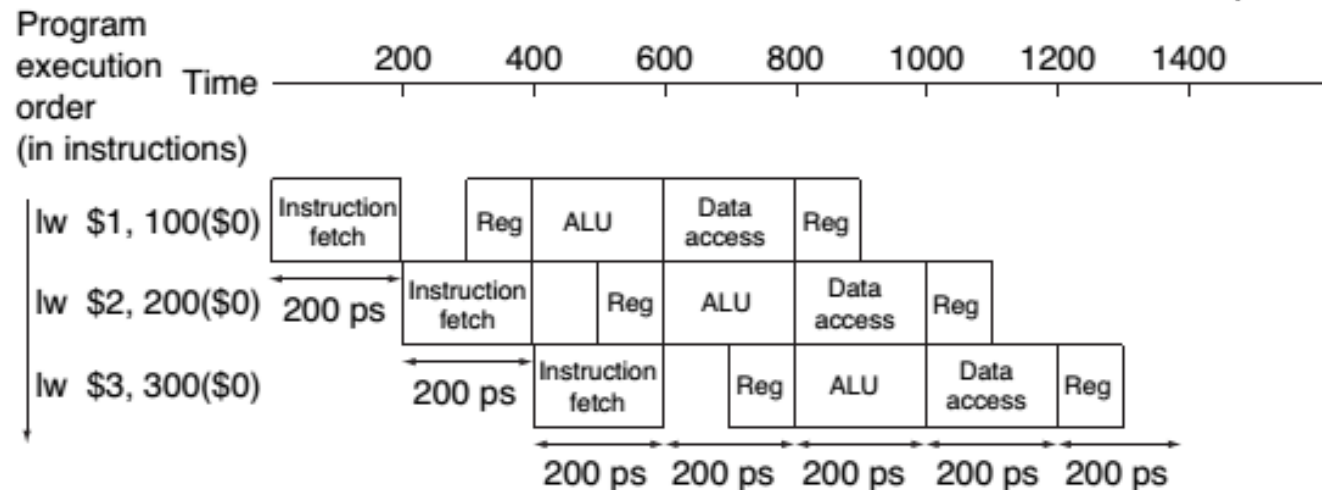
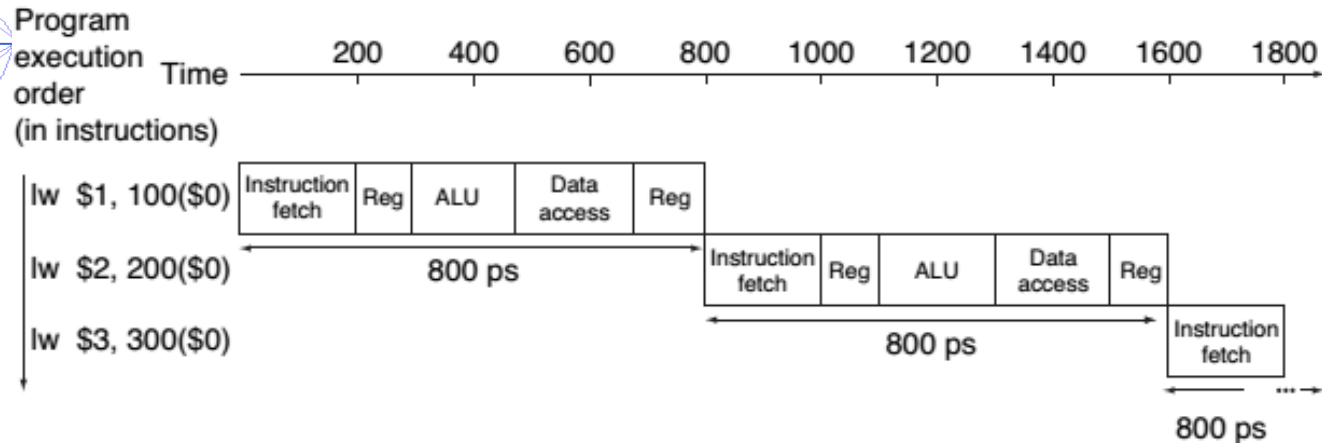
Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

- Xét một bộ xử lý với 8 lệnh cơ bản: load word (*lw*), store word (*sw*), add (*add*), subtract (*sub*), AND (*and*), OR (*or*), set less than (*slt*), và nhảy với điều kiện bằng (*beq*).
- Giả sử thời gian hoạt động các công đoạn như sau: 200 ps cho truy xuất bộ nhớ, 200 ps cho tính toán của ALU, 100 ps cho thao tác đọc/ghi thanh ghi
- So sánh thời gian trung bình giữa các lệnh của hiện thực đơn chu kỳ và pipeline.

Instruction class	Instruction fetch	Register read	ALU operation	Data access	Register write	Total time
Load word (<i>lw</i>)	200 ps	100 ps	200 ps	200 ps	100 ps	800 ps
Store word (<i>sw</i>)	200 ps	100 ps	200 ps	200 ps		700 ps
R-format (<i>add</i> , <i>sub</i> , <i>AND</i> , <i>OR</i> , <i>slt</i>)	200 ps	100 ps	200 ps		100 ps	600 ps
Branch (<i>beq</i>)	200 ps	100 ps	200 ps			500 ps



Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)



Ví dụ hình ảnh 3 lệnh lw thực hiện theo kiểu không pipeline, đơn chu kỳ (hình trên) và có pipeline (hình dưới)

→ Thời gian giữa lệnh thứ nhất và thứ ba trong không pipeline là $2 \times 800 = 1600$ ps, nhưng trong pipeline là $2 \times 200 = 400$ ps



Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

Sự tăng tốc của pipeline

❖ **Trong trường hợp lý tưởng:** khi mà các công đoạn pipeline hoàn toàn bằng nhau thì thời gian giữa hai lệnh liên tiếp được thực thi trong pipeline bằng:

$$\text{Thời gian giữa hai lệnh liên tiếp pipeline} = \frac{\text{thời gian giữa hai lệnh liên tiếp không pipeline}}{\text{số tầng pipeline}}$$

Như vậy, trong ví dụ trên, thời gian giữa hai lệnh liên tiếp có pipeline bằng 160 ps ($800:5 = 160$)

→ Trong trường hợp lý tưởng, pipeline sẽ tăng tốc so với không pipeline với số lần đúng bằng số tầng của pipeline.

❖ **Trong thực tế:** Các công đoạn thực tế không bằng nhau, việc áp dụng pipeline phải chọn công đoạn dài nhất để làm một chu kỳ pipeline.

Vì vậy, trong ví dụ trên, thời gian liên tiếp giữa hai lệnh pipeline là 200 ps. Và áp dụng pipeline tăng tốc gấp 4 lần so với không pipeline.

$\text{Speed-up} \approx \frac{\text{Thời gian giữa hai lệnh liên tiếp không pipeline}}{\text{Thời gian giữa hai lệnh liên tiếp pipeline}} \approx 800 : 200 = 4 < 5$ (number pipeline stages)

→ Trong thực tế, pipeline sẽ tăng tốc so với không pipeline với số lần nhỏ hơn số tầng của pipeline.



Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

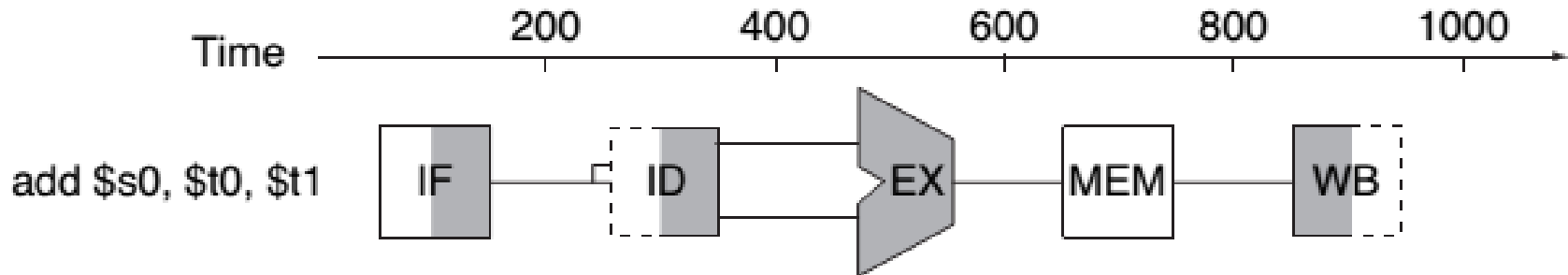
Lưu ý, pipeline tăng tốc so với không pipeline:

- ❖ Kỹ thuật pipeline **không** giúp giảm thời gian thực thi của từng lệnh riêng lẻ mà giúp giảm tổng thời gian thực thi của đoạn lệnh/chương trình chứa nhiều lệnh (từ đó giúp thời gian trung bình của mỗi lệnh giảm)
- ❖ Việc giúp giảm thời gian thực thi cho nhiều lệnh vô cùng quan trọng, vì các chương trình chạy trong thực tế thông thường lên đến hàng tỉ lệnh.



Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

Quy ước trình bày 5 công đoạn thực thi một lệnh của pipeline:



Lưu ý cách vẽ hình các công đoạn pipeline như sau:

- ✓ Khối tô đen hoàn toàn hoặc để trắng hoàn toàn: Trong mỗi công đoạn pipeline, nếu lệnh thực thi không làm gì trong công đoạn này sẽ được tô trắng, ngược lại sẽ được tô đen.

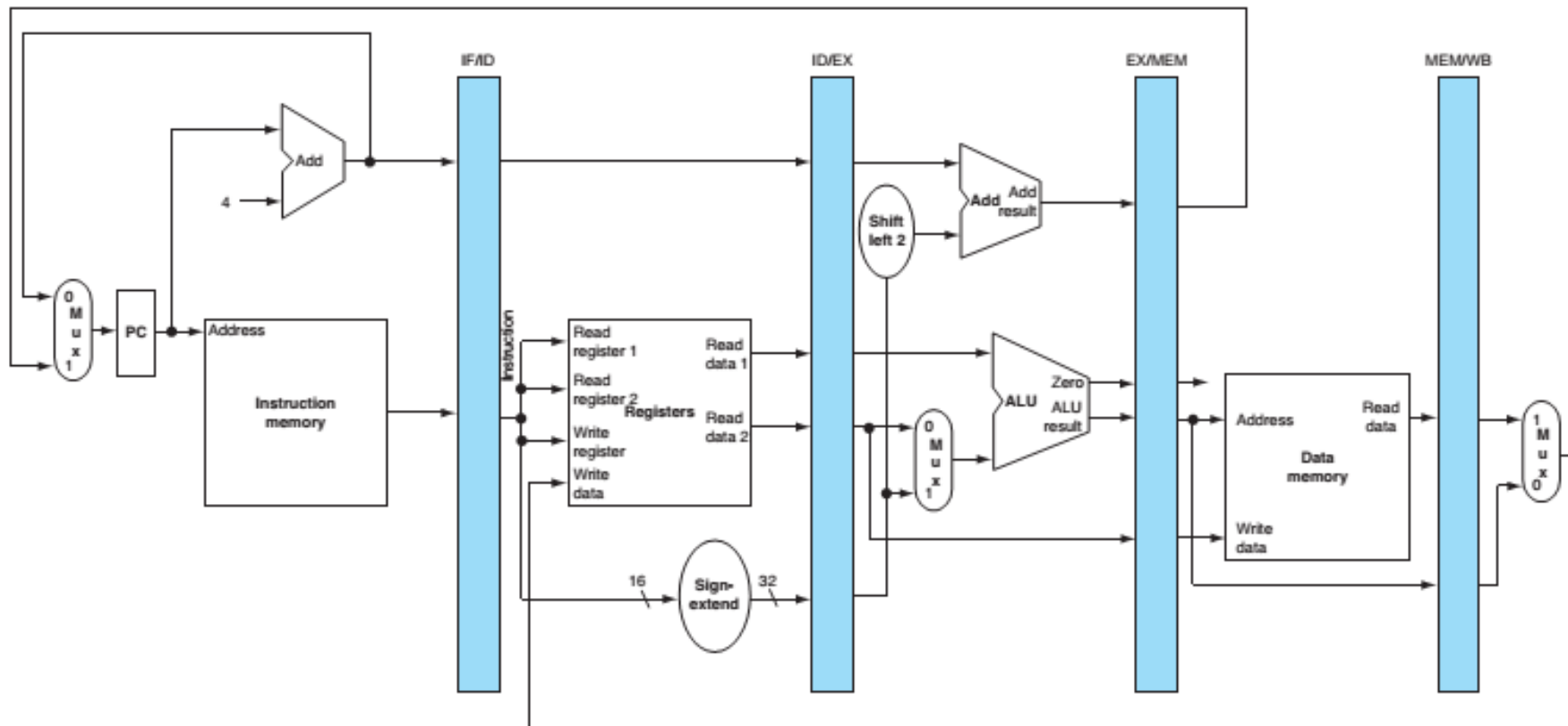
Ví dụ lệnh “add” có EX đen và MEM trắng tức lệnh này có tính toán trong công đoạn EX và không truy xuất bộ nhớ dữ liệu trong công đoạn MEM.

- ✓ Các công đoạn liên qua đến bộ nhớ và thanh ghi có thể tô nửa trái hoặc nửa phải đen: Nếu nửa phải tô đen, tức công đoạn đó đang thực hiện thao tác đọc; ngược lại nếu nửa trái tô đen, công đoạn đó đang thực hiện thao tác ghi.



Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

Hình ảnh datapath có hỗ trợ pipeline



Chi tiết về datapath và control cho pipeline có thể xem thêm tại phần 4.6 sách tham khảo chính.



Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

Các xung đột có thể xảy ra khi áp dụng kỹ thuật pipeline (Pipeline Hazards):

Xung đột là trạng thái mà lệnh tiếp theo không thể thực thi trong chu kỳ pipeline ngay sau đó (hoặc thực thi nhưng sẽ cho ra kết quả sai), thường do một trong ba nguyên nhân sau:

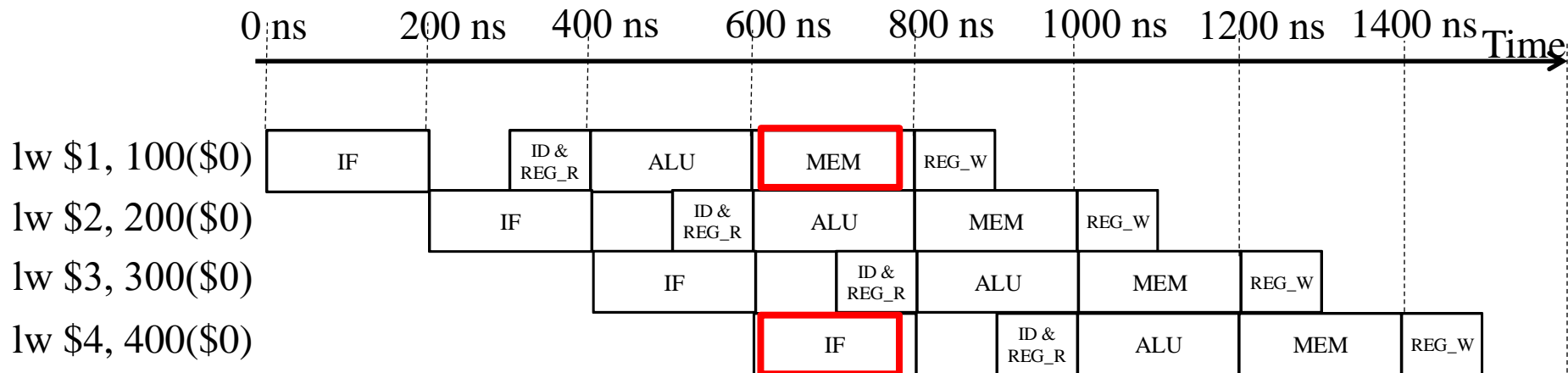
- ❖ **Xung đột cấu trúc (Structural hazard):** xảy ra khi hai hoặc nhiều công đoạn của các lệnh khác nhau sử dụng cùng một tầng cấu trúc phần cứng (tài nguyên phần cứng trong cùng thời gian). Nói cách khác, xung đột cấu trúc xảy ra khi có hai lệnh cùng truy xuất vào một tài nguyên phần cứng nào đó cùng một lúc.
- ❖ **Xung đột dữ liệu (Data hazard):** xảy ra khi tại thời điểm lệnh kế tiếp cần sử dụng kết quả dữ liệu của lệnh trước đó, nhưng lệnh trước đó chưa hoàn thành việc thực thi
- ❖ **Xung đột điều khiển (Control/Branch hazard):** xảy ra ngay sau các lệnh điều khiển nhảy - lệnh liền kề được thực thi khi mà giá trị địa chỉ của lệnh kế tiếp chương trình muốn nhảy đến chưa được tính toán xong bởi lệnh hiện tại



Xung đột (hazard) trong kỹ thuật ống dẫn

■ Xung đột cấu trúc

- Giả sử: Bộ nhớ lệnh và bộ nhớ dữ liệu được phân ở 2 vùng khác nhau trên cùng một bộ nhớ



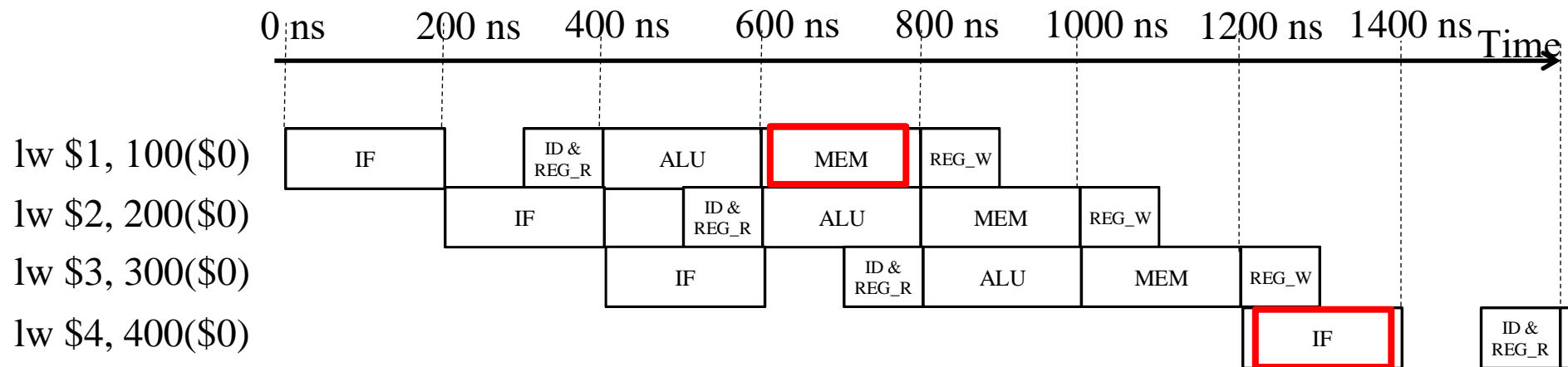
- Xung đột cấu trúc xảy ra do hai lệnh cùng truy xuất vào bộ nhớ trong khoảng thời gian [600ns:800ns].



Xung đột (hazard) trong kỹ thuật ống dẫn

■ Xung đột cấu trúc

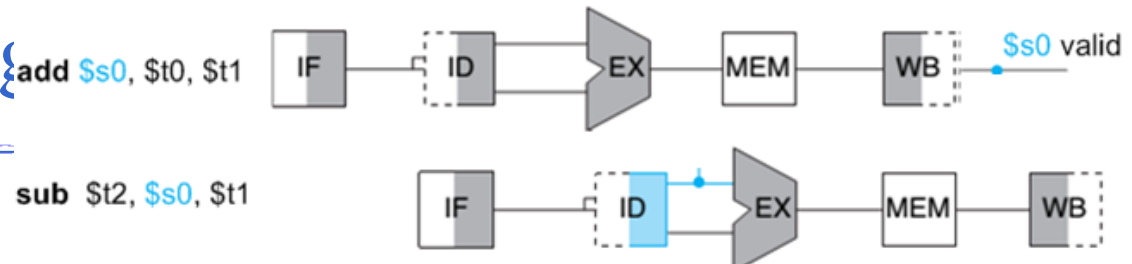
- Xử lý xung đột cấu trúc: Dịch lệnh kế tiếp cho đến khi công đoạn MEM và IF không còn trùng nhau.





Xung đột dữ liệu

Ví dụ cho đoạn lệnh sau: *add \$s0, \$t0, \$t1*
sub \$t2, \$s0, \$t3



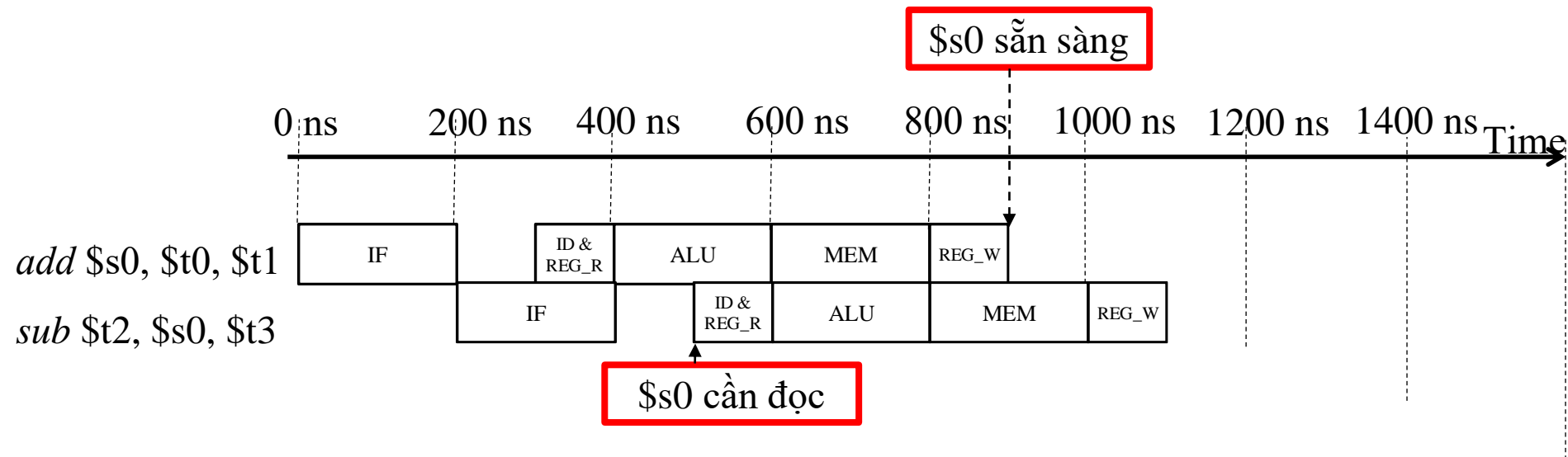
Trong ví dụ trên, nếu áp dụng pipeline bình thường thì công đoạn ID của lệnh *sub* sẽ thực hiện cùng lúc với cộng đoạn EX của lệnh *add*. Trong công đoạn ID, lệnh *sub* sẽ cần đọc giá trị của thanh ghi *\$s0*, trong khi đó giá trị mới của thanh ghi *\$s0* phải tới công đoạn WB của lệnh *add* mới sẵn sàng. Vì vậy, nếu thực hiện pipeline thông thường, trường hợp này sẽ xảy ra xung đột dữ liệu



Xung đột (hazard) trong kỹ thuật ống dẫn

■ Xung đột dữ liệu

□ Ví dụ 1:



- Xung đột dữ liệu xảy ra do tại thời điểm 500ns lệnh *sub* cần đọc giá trị \$s0 từ kết quả của lệnh *add*, tuy nhiên giá trị \$s0 của lệnh *add* chỉ sẵn sàng sau 900ns.

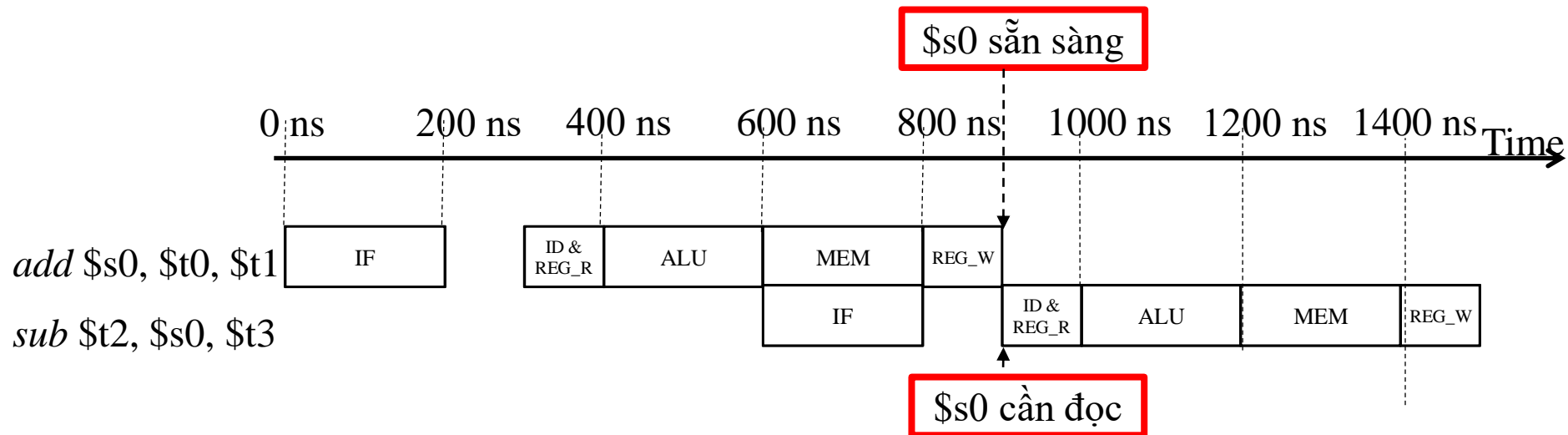


Xung đột (hazard) trong kỹ thuật ống dẫn

■ Xung đột dữ liệu

□ Xử lý xung đột – Với ví dụ 1

- Phương pháp 1: Dịch lệnh *sub* cho đến thời điểm \$s0 cần đọc trùng với thời điểm \$s0 sẵn sàng từ lệnh *add* → Dịch 2 chu kỳ



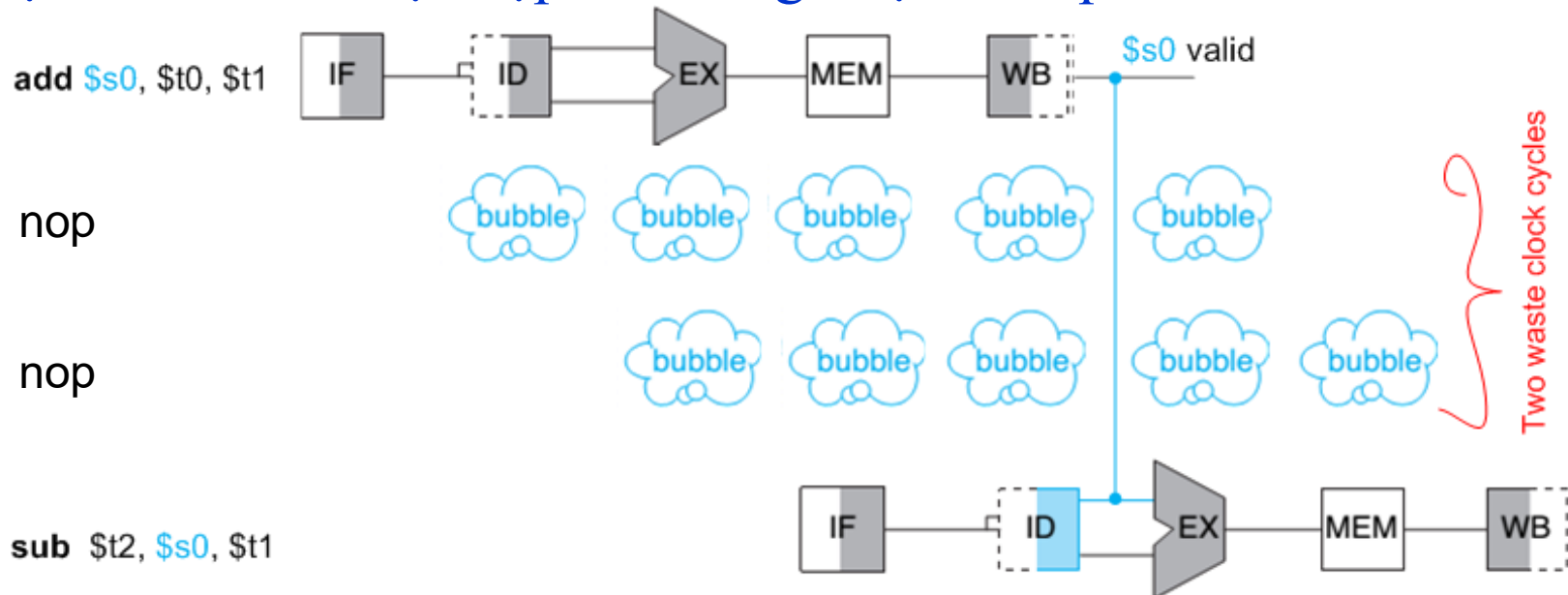


Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

Xung đột dữ liệu

Ví dụ cho đoạn lệnh sau: *add \$s0, \$t0, \$t1*
sub \$t2, \$s0, \$t3

Hay nói cách khác là chờ **thêm hai chu kỳ xung xung clock** thì lệnh *sub* mới được nạp vào bằng 2 lệnh “nop”



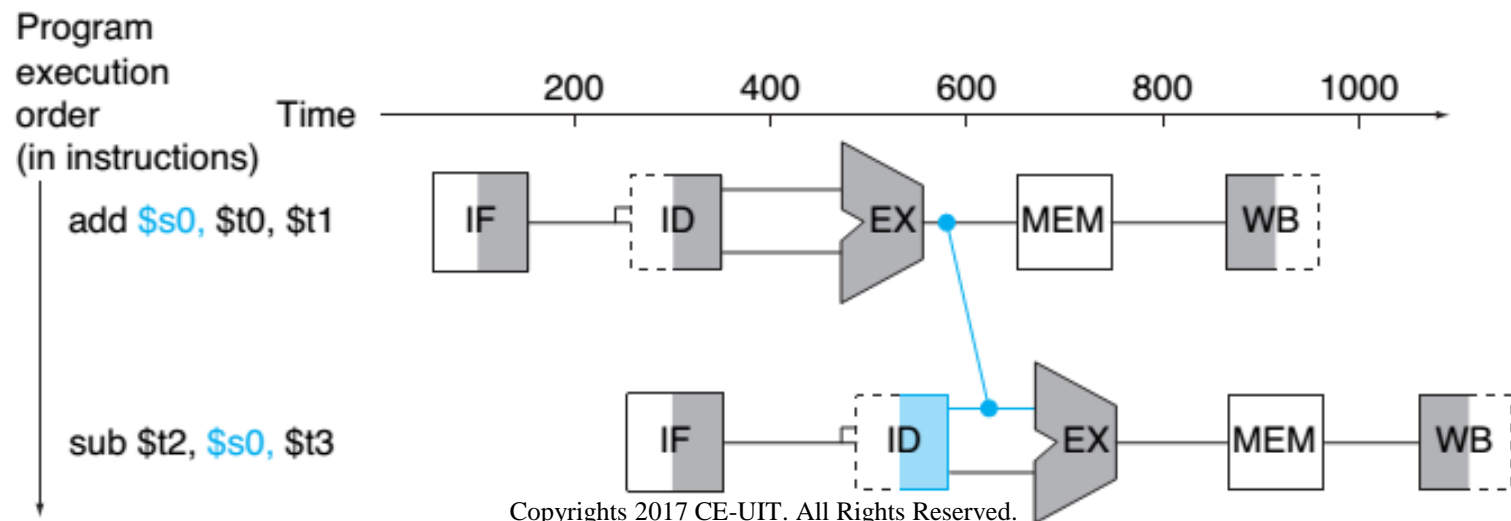


Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

Xung đột dữ liệu

- ❖ Thay vì chờ một số chu kỳ đến khi dữ liệu cần sẵn sàng, một kỹ thuật có thể được áp dụng để rút ngắn số chu kỳ rồi, gọi là **kỹ thuật nhìn trước (forwarding hay bypassing)**.

Như trong ví dụ trước, thay vì chờ sau hai chu kỳ rồi mới nạp lệnh *sub* vào, ngay khi ALU hoàn thành tính toán tổng cho lệnh *add* thì tổng này cũng được cung cấp ngay cho công đoạn EX của lệnh *sub* (thông qua một bộ đệm dữ liệu gắn thêm bên trong) để ALU tính toán kết quả cho *sub* nhanh.





Xung đột (hazard) trong kỹ thuật ống dẫn

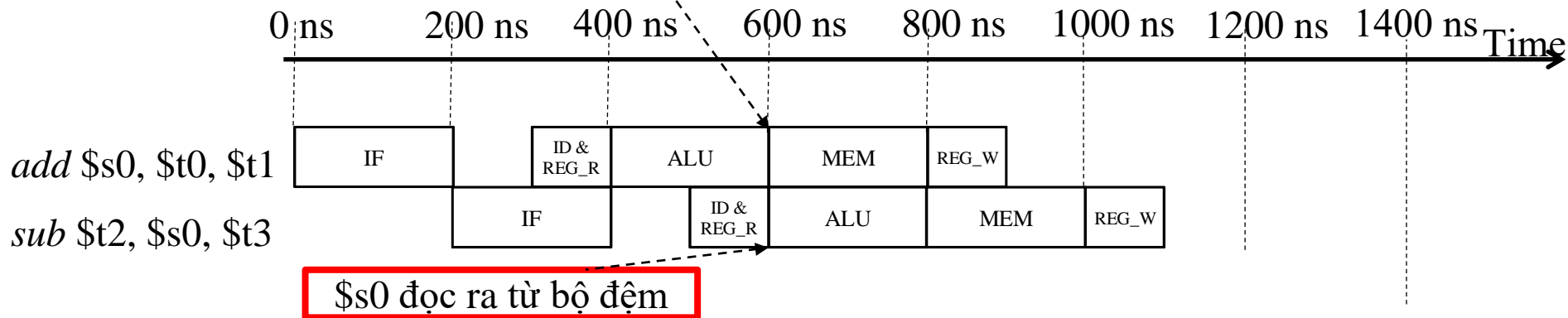
■ Xung đột dữ liệu

□ Xử lý xung đột – Với ví dụ 1

- Phương pháp 2: Sử dụng kỹ thuật nhìn trước (ALU-ALU forwarding), thay vì phải chờ kết thúc thực thi lệnh *add* để ta có \$s0 sẵn sàng, ta có thể nhìn được trước: trong lệnh *add* giá trị \$s0 là kết quả ngõ ra của khối ALU; trong lệnh *sub* giá trị \$s0 sẽ đi vào khối ALU

➔ Dịch sao cho cuối công đoạn ALU của lệnh *add* trùng với đầu công đoạn ALU của lệnh *sub*

\$s0 được lưu vào bộ đệm

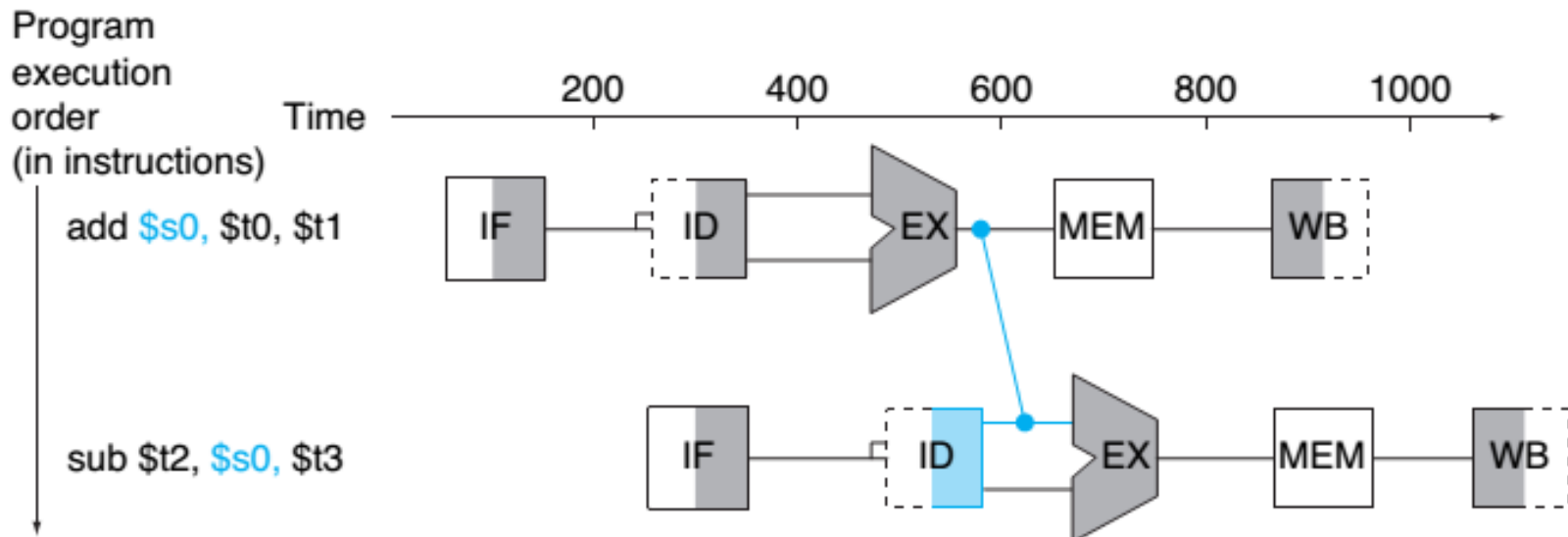




Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

Xung đột dữ liệu

- ❖ Kỹ thuật nhìn trước: một phương pháp giải quyết xung đột dữ liệu bằng đưa thêm vào các bộ đệm phụ bên trong, các dữ liệu cần có thể được truy xuất từ bộ đệm này hơn là chờ đợi đến khi nó sẵn sàng trong bộ nhớ hay trong thanh ghi.





Xung đột dữ liệu

Lưu ý, với lệnh *lw* và các lệnh có chức năng tương tự, thông thường kết quả cuối của nó không phải khi hoàn tất công đoạn EX mà là khi hoàn tất công đoạn MEM.



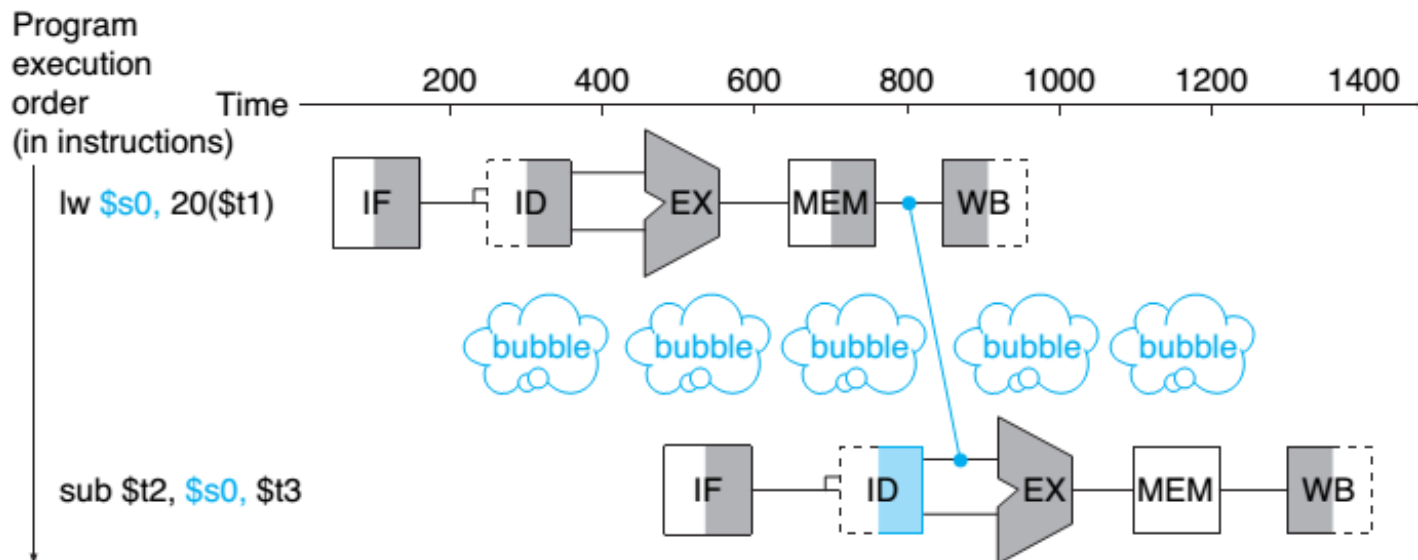
Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

Xung đột dữ liệu

Xét ví dụ sau:

```
lw    $s0, 20($t1)
sub   $t2, $s0, $t3
```

Với lệnh *lw*, dữ liệu mong muốn sẽ chỉ sẵn sàng sau 4 chu kỳ pipeline (tức sau khi công đoạn MEM hoàn tất). Vì vậy, giả sử dữ liệu đầu ra của công đoạn MEM của lệnh *lw* được truyền tới đầu vào công đoạn EX của lệnh *sub* theo sau, thì lệnh *sub* vẫn phải chờ sau một chu kỳ rồi mới được nạp vào.

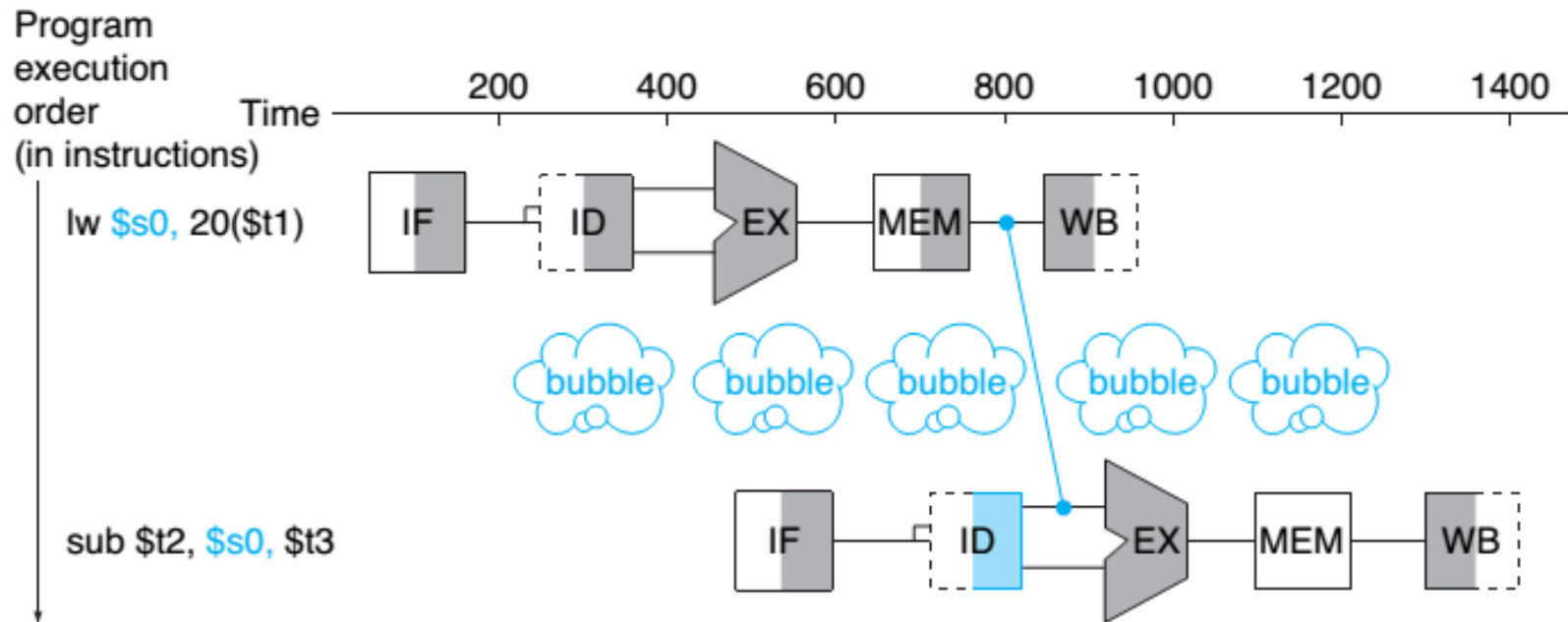




Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

Xung đột dữ liệu

Kỹ thuật forwarding có thể hỗ trợ giải quyết xung đột dữ liệu hiệu quả, tuy nhiên nó không thể ngăn chặn tất cả các trường hợp chu kỳ rồi



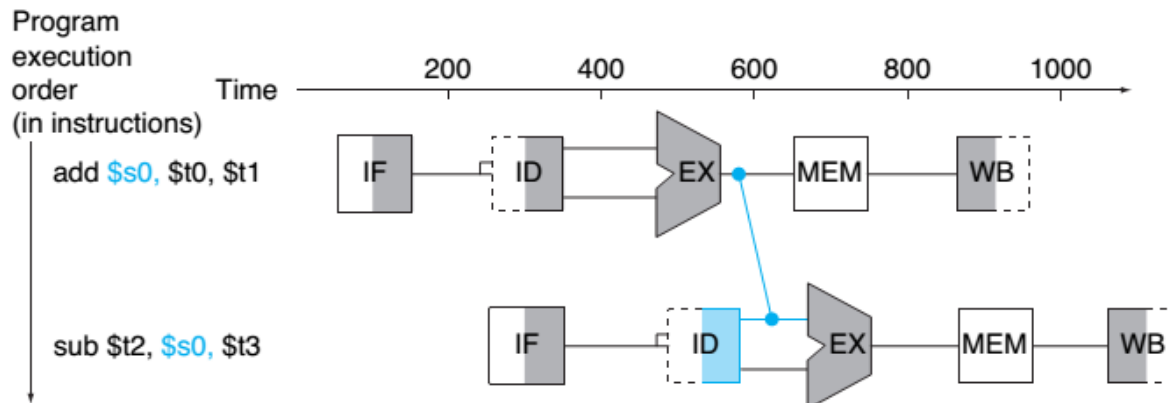


Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

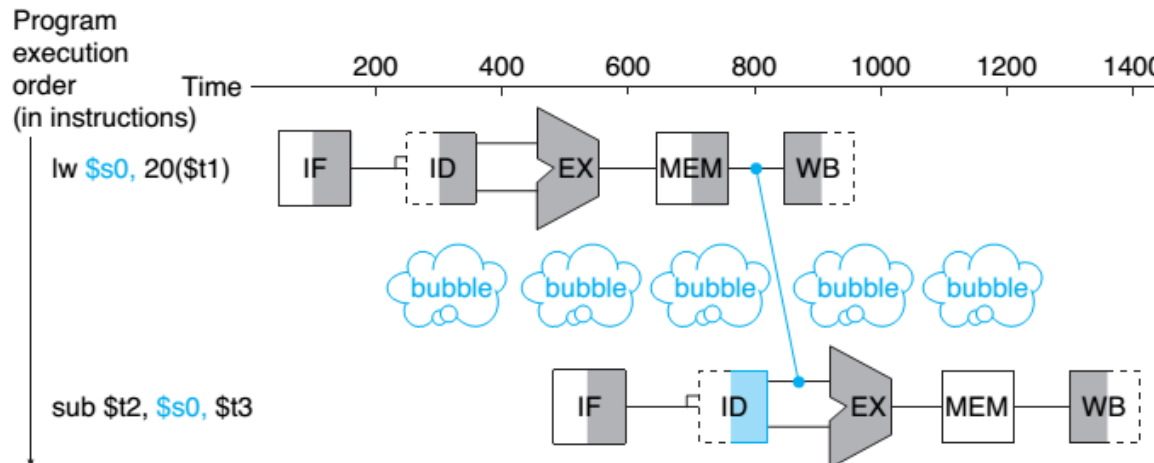
Xung đột dữ liệu

Tóm lại, với kỹ thuật forwarding có:

- ✓ **ALU-ALU forwarding** hay **EX-EX forwarding** (hình 1)
- ✓ **MEM-ALU forwarding** hay **MEM-EX forwarding** (hình 2)



Hình 1.



Hình 2.



Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

Xung đột điều khiển

- ❖ Một số lệnh nhảy có điều kiện và không điều kiện trong MIPS (branches, jumps) tạo ra xung đột điều khiển này

Ví dụ xét đoạn chương trình sau:

```
add $4, $5, $6
beq $1, $2, label
lw $3, 300($s0)
```

Nếu áp dụng pipeline thông thường, tại chu kỳ thứ ba của pipeline, khi *beq* đang thực thi công đoạn ID thì lệnh *lw* sẽ được nạp vào. Nhưng nếu điều kiện bằng của lệnh *beq* xảy ra thì lệnh thực hiện tiếp sau đó không phải là *lw* mà là lệnh được gán nhãn '*label*', lúc này xảy ra xung đột điều khiển.

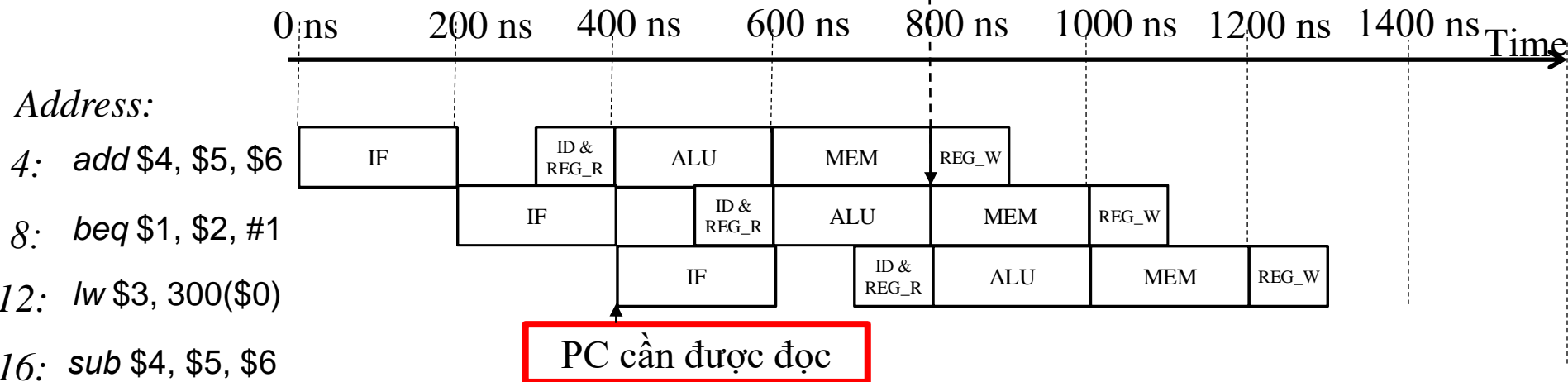
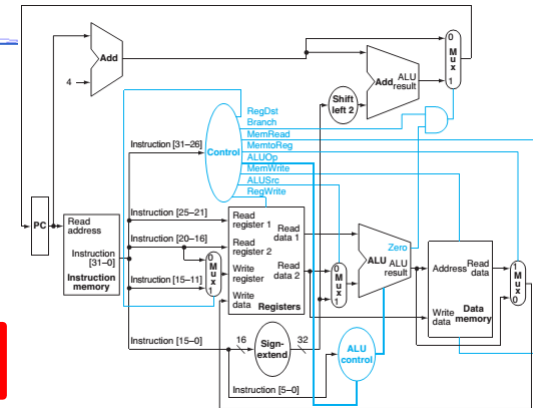


Xung đột (hazard) trong kỹ thuật ống dẫn

■ Xung đột điều khiển

□ Ví dụ:

PC cho lệnh kế tiếp sẵn sàng



□ Xung đột điều khiển xảy ra do tại thời điểm 400ns, khối điều khiển cần đọc giá trị từ thanh ghi PC để nạp lệnh kế tiếp, tuy nhiên giá trị PC cho lệnh kế tiếp chỉ sẵn sàng sau $(800 + \text{delta})\text{ns}$, để đơn giản hóa giả sử $\text{delta} = 0\text{ns}$.



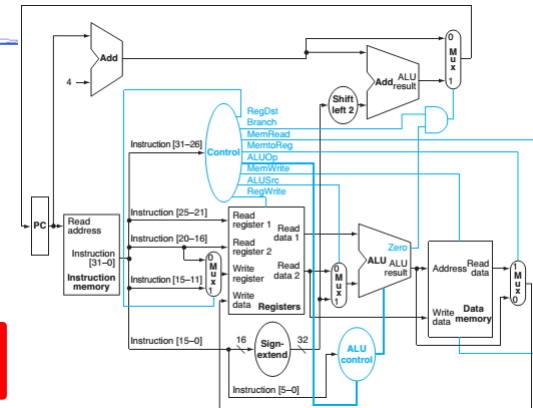
Xung đột (hazard) trong kỹ thuật ống dẫn

Xung đột điều khiển

Xử lý xung đột:

Phương pháp 1:

PC cho lệnh kế tiếp sẵn sàng



0 ns 200 ns 400 ns 600 ns 800 ns 1000 ns 1200 ns 1400 ns Time

Address:

4: *add* \$4, \$5, \$6

8: *beq* \$1, \$2, #1

12: *lw* \$3, 300(\$0)

16: *sub* \$4, \$5, \$6

PC cần được đọc (có thể là 12-lw hoặc 16-sub)

Dịch thời điểm bắt đầu công đoạn IF cho lệnh thứ ba trùng với cuối công đoạn ALU của lệnh *beq*. Như vậy chương trình sẽ chậm đi 2 chu kỳ để xử lý xung đột



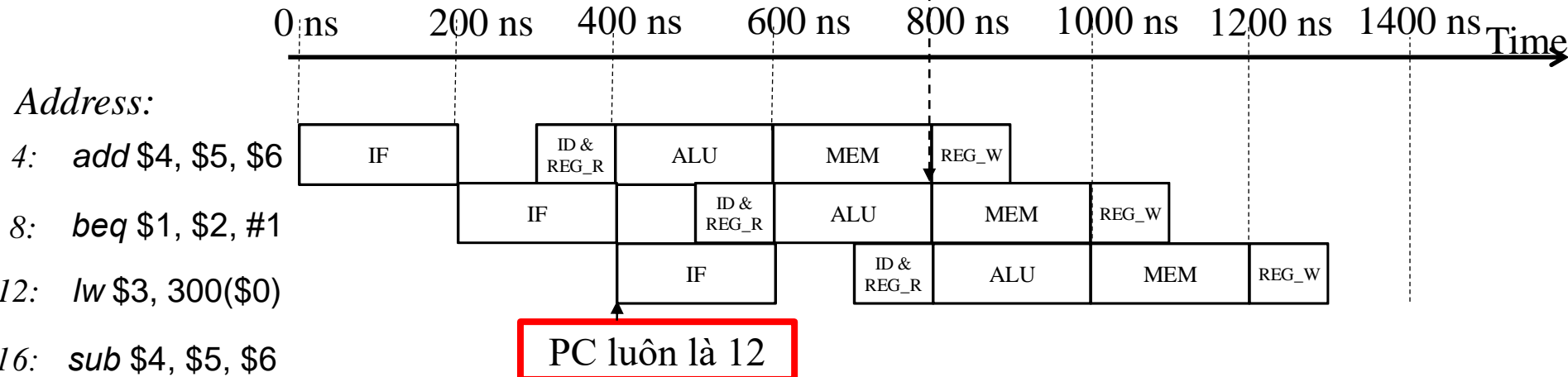
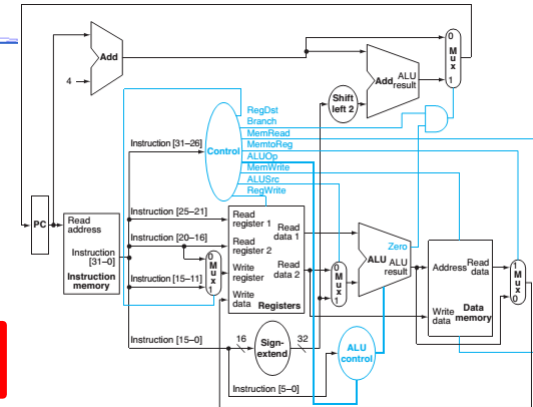
Xung đột (hazard) trong kỹ thuật ống dẫn

Xung đột điều khiển

Xử lý xung đột:

Phương pháp 2:

PC cho lệnh kế tiếp sẵn sàng



Luôn dự đoán trước rằng $\$1 \neq \$2 \rightarrow$ lệnh kế tiếp sẽ là lệnh liên kế sau nó, tức là vi xử lý sẽ thực thi công đoạn nạp lệnh với giá trị PC = 12 (lw) và thực thi các công đoạn bình thường

Sau thời điểm 800ns, tức là thời điểm lệnh beq thực hiện xong công đoạn ALU sẽ biết được $\$1$ có bằng $\$2$ hay không



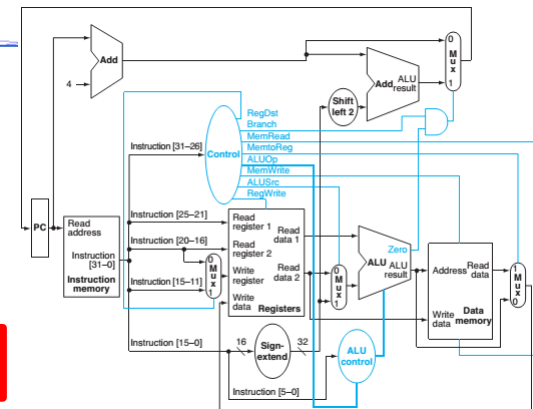
Xung đột (hazard) trong kỹ thuật ống dẫn

Xung đột điều khiển

Xử lý xung đột:

Phương pháp 2:

PC cho lệnh kế tiếp sẵn sàng



0 ns 200 ns 400 ns 600 ns 800 ns 1000 ns 1200 ns 1400 ns Time

Address:

4: *add* \$4, \$5, \$6

8: *beq* \$1, \$2, #1

12: *lw* \$3, 300(\$0)

16: *sub* \$4, \$5, \$6

PC luôn là 12

- Nếu $\$1 \neq \2 , tức là dự đoán đúng \rightarrow lệnh *lw* tiếp tục thực thi bình thường để hoàn thành công việc \rightarrow không bị chậm đi chu kỳ nào để xử lý xung đột.



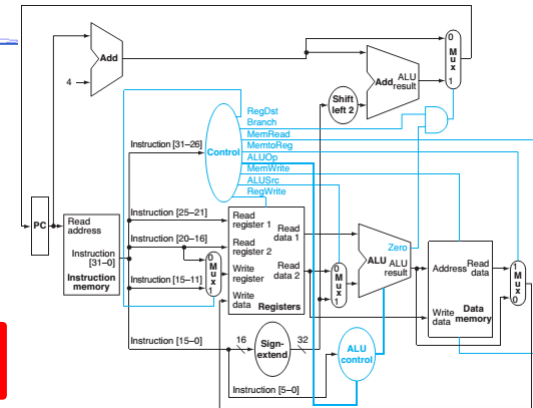
Xung đột (hazard) trong kỹ thuật ống dẫn

■ Xung đột điều khiển

□ Xử lý xung đột:

■ Phương pháp 2:

PC cho lệnh kế tiếp sẵn sàng



0 ns 200 ns 400 ns 600 ns 800 ns 1000 ns 1200 ns 1400 ns Time

Address:

4: *add \$4, \$5, \$6*

8: *beq \$1, \$2, #1*

12: *lw \$3, 300(\$0)*

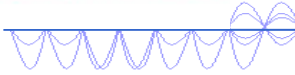
16: *sub \$4, \$5, \$6*

PC nạp lại 16

□ Nếu $\$1 == \2 , tức là dự đoán sai → lệnh *lw* đang thực thi sẽ bị hủy và vi xử lý sẽ thực thi lại công đoạn nạp lệnh với giá trị PC = 16 → bị chậm đi 2 chu kỳ để xử lý xung đột.



Xung đột (hazard) trong kỹ thuật ống dẫn



■ Xung đột điều khiển

- Xử lý xung đột: Giả sử, một chương trình trong đó có n lệnh beq:
 - Nếu áp dụng phương pháp 1 thì chương trình thực thi sẽ chậm đi $2*n$ chu kỳ để xử lý xung đột.
 - Nếu áp dụng phương pháp 2, vì xác suất dự đoán đúng và dự đoán sai sẽ là 50-50, nên số chu kỳ trung bình sẽ chỉ bị chậm đi $1*n$ chu kỳ để xử lý xung đột.



Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

Tổng kết:

- Hiểu kỹ thuật ống dẫn là gì
- Ba xung đột mà kỹ thuật ống dẫn có thể gây ra:
 - ✓ Xung đột cấu trúc
 - ✓ Xung đột dữ liệu
 - ✓ Xung đột điều khiển
- Cách giải quyết khi xảy ra các xung đột trên



Bài tập kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

Có 2 dạng bài tập cơ bản:

- Tình chu kỳ, thời gian thực thi lệnh
 - Pipeline
 - Không pipeline đơn chu kỳ
 - Không pipeline đa chu kỳ
- Giải quyết xung đột dữ liệu khi sử dụng pipeline:
 - Không sử dụng forwarding
 - Sử dụng full forwarding (ALU-ALU và MEM-ALU)
 - Chỉ sử dụng ALU-ALU forwarding (không có MEM-ALU)



Kỹ thuật ống dẫn (pipeline)

❖ Lý thuyết: Đọc sách tham khảo

- Mục: 4.5
- Sách: *Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface*, Patterson, D. A., and J. L. Hennessy, Morgan Kaufman, Revised Fourth Edition, 2011.

❖ Bài tập: file đính kèm