



IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

# IKI 30320: Sistem Cerdas

## Kuliah 10: Logical Agents

Ruli Manurung

Fakultas Ilmu Komputer  
Universitas Indonesia

10 Oktober 2007



# Outline

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- 1 Knowledge-based agent
- 2 Contoh: Wumpus World
- 3 Logic
- 4 Propositional logic
- 5 Metode pembuktian
- 6 Ringkasan



# Outline

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- 1 Knowledge-based agent
- 2 Contoh: Wumpus World
- 3 Logic
- 4 Propositional logic
- 5 Metode pembuktian
- 6 Ringkasan



# Pentingnya pengetahuan

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

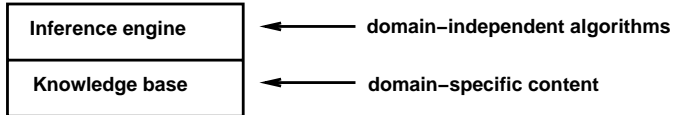
Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- **Problem solving agent**: memilih solusi di antara kemungkinan yang ada. Apa yang ia “ketahui” tentang dunia tidak berkembang → problem solution (initial state, successor function, goal test)
- **Knowledge-based agent**: lebih “pintar”. Ia “mengetahui” hal-hal tentang dunia dan dapat melakukan **reasoning** (berpikir, bernalar) mengenai:
  - Hal-hal yang tidak diketahui sebelumnya (imperfect/partial information)
  - Tindakan yang paling baik untuk diambil





# Knowledge-based agent

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- **Knowledge Base**: apa yang “diketahui” oleh si agent
- Pendekatan **deklaratif** membangun agent: “beritahu” informasi yang relevan, simpan dalam KB → (TELL).
- Agen dapat ditanya (atau bertanya diri sendiri) apa yang sebaiknya dilakukan berdasarkan KB → (ASK).
- Sebuah knowledge-based agent harus bisa:
  - **Merepresentasikan** world, state, action, dst.
  - Menerima informasi baru (dan meng-**update** representasinya)
  - Menyimpulkan pengetahuan lain yang tidak eksplisit (**hidden** property)
  - Menyimpulkan **action** apa yang perlu diambil



# Knowledge Base

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- Knowledge Base:
  - Himpunan representasi fakta yang diketahui tentang lingkungannya
  - Tiap fakta disebut **sentence**.
  - Dinyatakan dalam bahasa **formal** → bisa diolah
  - TELL: menambahkan sentence baru ke KB.
- Inference Engine:
  - Menentukan fakta baru yang dapat diturunkan dari pengetahuan yang sudah ada dalam KB.
  - Menjawab pertanyaan (ASK) berdasarkan KB yang sudah.



# Representasi

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- Agent dapat dipandang dari **knowledge level**: informasi apa yang diketahuinya? Mis: sebuah robot “mengetahui” bahwa gedung B ada di antara gedung A dan gedung C.
- Agent dapat dipandang dari **implementation level**: bagaimana **representasi** informasi yang diketahuinya?
  - Logical sentence: `di_antara(gdB, gdA, gdC)`
  - Natural language: “Gedung B ada di antara gedung A dan gedung C”
  - Tabel posisi koordinat gedung-gedung
  - Gambar diagram peta Fasilkom (bitmap? vector?)
- Pilihan representasi berpengaruh thd. apa yang bisa dilakukan oleh inference engine.



# Pendekatan deklaratif vs. prosedural

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- Programmer memberitahu (TELL) agent informasi tentang environment.
- Kalau informasi kurang, agent bisa melengkapinya sendiri.
- Bandingkan dengan pendekatan **prosedural**: programmer secara eksplisit memprogram agent untuk bertindak.
- Kalau program tidak benar ... ? (error?)
- Ini adalah masalah **knowledge representation**: bagaimana representasi yang tepat?
  - **Expressive**: bisa menyatakan fakta tentang environment
  - **Tractable**: bisa diolah/diproses inference engine (dg. cepat?)

Knowledge is power

**Representation + Reasoning = Intelligence!**





# Outline

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- 1 Knowledge-based agent
- 2 Contoh: Wumpus World**
- 3 Logic
- 4 Propositional logic
- 5 Metode pembuktian
- 6 Ringkasan



# Aturan Main Wumpus World

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World
















Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- **Performance measure:** emas +1000, mati -1000, gerak -1, panah -10
- **Environment:** Matriks 4x4 kamar. Initial state [1,1]. Ada **gold**, **wumpus** dan **pit** yang lokasinya dipilih secara acak.
- **Percept:**
  - Breeze:** kamar di samping lubang jebakan ada hembusan angin
  - Glitter:** kamar di mana ada emas ada kilauan/sinar
  - Smell:** kamar di samping Wumpus berbau busuk
- **Action:** *maju*, belok *kiri* 90°, *kanan* 90°, *tembak* panah (hanya 1!), *ambil* benda

4				
3		  		
2				
1				
	1	2	3	4



# Sifat Wumpus World

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- (Fully) observable? Tidak, hanya bisa persepsi lokal
- Deterministic? Ya, hasil tindakan jelas & pasti
- Episodic? Tidak, tergantung action sequence
- Static? Ya, gold, wumpus, pit tidak bergerak
- Discrete? Ya
- Single agent? Tidak



# Menjelajahi Wumpus World

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

OK			
OK <div>A</div>	OK		



# Menjelajahi Wumpus World

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

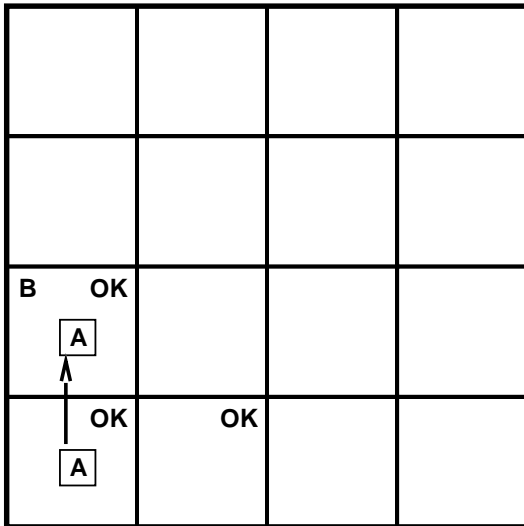
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan





# Menjelajahi Wumpus World

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

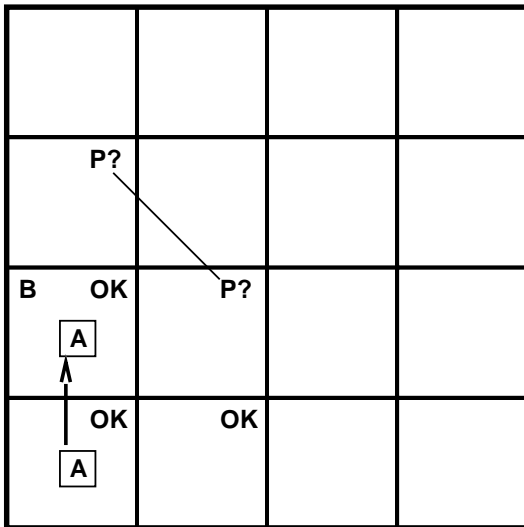
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan





# Menjelajahi Wumpus World

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

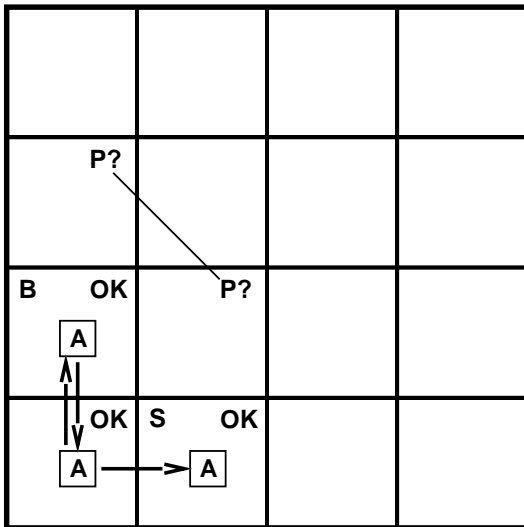
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan









# Menjelajahi Wumpus World

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

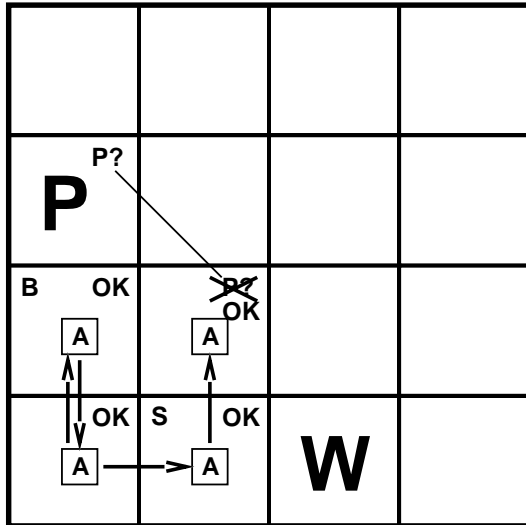
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan





# Menjelajahi Wumpus World

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

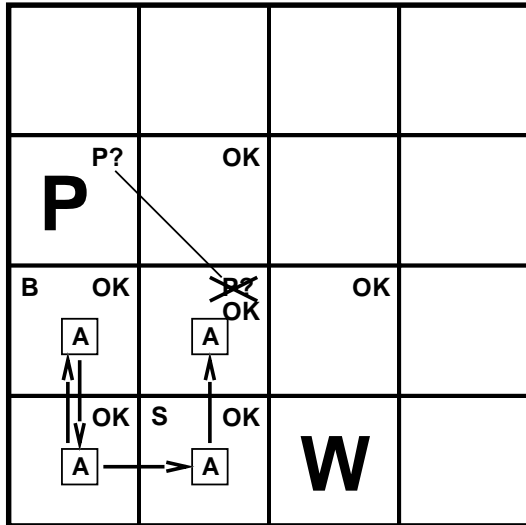
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan







# Outline

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- 1 Knowledge-based agent
- 2 Contoh: Wumpus World
- 3 Logic**
- 4 Propositional logic
- 5 Metode pembuktian
- 6 Ringkasan



# Knowledge representation language

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- **Knowledge representation language (KRL)**: bahasa yang digunakan untuk menyatakan fakta tentang “dunia”.
- **Syntax**: aturan yang mendefinisikan **sentence** yang sah dalam bahasa
- **Semantics**: aturan yang mendefinisikan “arti” sebuah **sentence**, mis: kebenaran sentence di dalam dunia



# Contoh KRL: bahasa aritmetika

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- **Syntax:**
  - $x + 2 \geq y$  adalah kalimat sah.
  - $x^2 + y \geq$  bukan kalimat sah.
- **Semantics:**  $x + 2 \geq y$  benar jhj bilangan  $x + 2$  tidak lebih kecil dari bilangan  $y$ :
  - $x + 2 \geq y$  benar dalam “dunia” di mana  $x = 7, y = 1$
  - $x + 2 \geq y$  salah dalam “dunia” di mana  $x = 0, y = 6$



# Contoh KRL: bahasa Indonesia

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- **Syntax:**
  - “*Jakarta adalah ibukota Indonesia*” adalah kalimat sah.
  - “*Ibu Indonesia kota Jakarta adalah*” bukan kalimat sah.
- **Semantics:** “*X adalah ibukota Y*” benar jhjj X adalah pusat pemerintahan negara Y.
  - “*Jakarta adalah ibukota Indonesia*” benar dalam “dunia” kita sekarang.
  - “*Jakarta adalah ibukota Indonesia*” salah dalam “dunia” th. 1948 (Yogya? Bukittinggi?).



# Logika sebagai KRL

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- **Logics**: bahasa formal untuk merepresentasikan fakta sedemikian shg. kesimpulan (fakta baru, jawaban) dapat ditarik.
- Ada banyak metode **inference** yang diketahui.
- Kita bisa membangun agent Wumpus World dengan logika: memanfaatkan perkembangan logika oleh ahli matematika, filsafat selama ratusan tahun!





# Entailment

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- **Entailment** berarti sesuatu fakta bisa disimpulkan dari (kumpulan) fakta lain.
- $KB \models \alpha$ :  $KB$  entails sentence  $\alpha$  jh  $\alpha$  true dalam semua “dunia” di mana  $KB$  true.
- Contoh:
  - $KB$  mengandung sentence “*Anto ganteng*” dan “*Ani cantik*”.
  - $KB \models \alpha_1$ : “*Anto ganteng dan Ani cantik*”
  - $KB \not\models \alpha_2$ : “*Anto pintar*”
  - $x + y = 4 \models 4 = x + y$



# Inference/reasoning

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

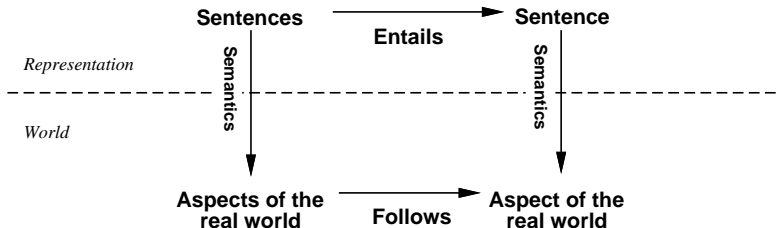
Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- **Inference**, atau **reasoning**: pembentukan fakta (sentence) baru yang meng-**entail** fakta-fakta lama.
- **Reasoning** bukan dilakukan pada fakta di dunia (semantics), melainkan **representasi** fakta dalam KRL si agent (syntax).
- Otak manusia melakukan proses reasoning dalam suatu bentuk syntax!





# Model

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

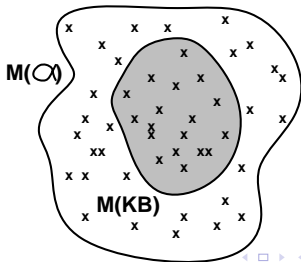
Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

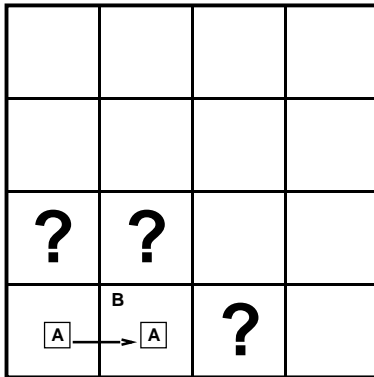
- **Model**: sebuah “dunia” di mana kebenaran suatu sentence bisa diuji.
- $m$  adalah model  $\alpha$  jika  $\alpha$  **true** di “dalam”  $m$ .
- $M(\alpha)$  adalah himpunan semua model dari  $\alpha$
- $KB \models \alpha$  jh  $M(KB) \subseteq M(\alpha)$
- Mis:  
 $KB = \text{Anto ganteng dan Ani cantik.}$   
 $\alpha = \text{Anto ganteng.}$





# Entailment dalam Wumpus World

Setelah melihat [1,1] OK, [2,1] Breeze:



Model jebakan di [2,1],[2,2],[3,1]: 3 pilihan boolean  $\rightarrow$  8 kemungkinan model.



# Model (sebagian) Wumpus World

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

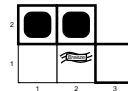
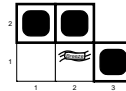
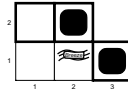
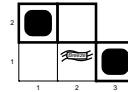
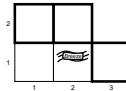
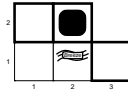
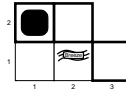
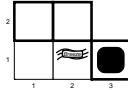
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan





# Model (sebagian) Wumpus World

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

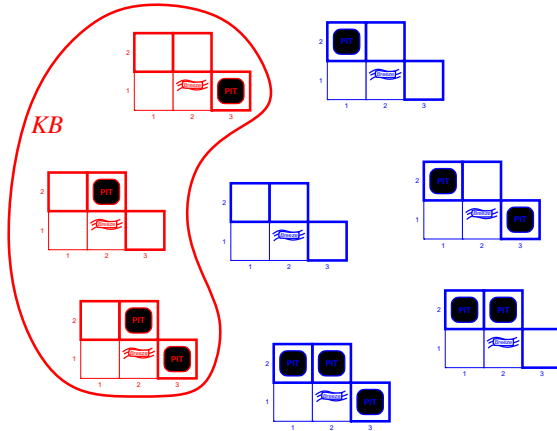
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan



$KB = \text{pengamatan (percept)} + \text{aturan main Wumpus World}$



# Model (sebagian) Wumpus World

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

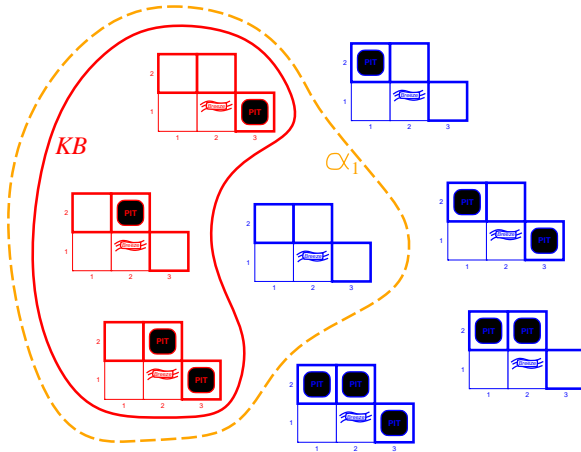
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan



$\alpha_1$  = "Kamar [1,2] aman",  $KB \models \alpha_1$ , dibuktikan dengan **model checking**:  
periksa **semua** kemungkinan  $M(KB), M(\alpha_1)$



# Model (sebagian) Wumpus World

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

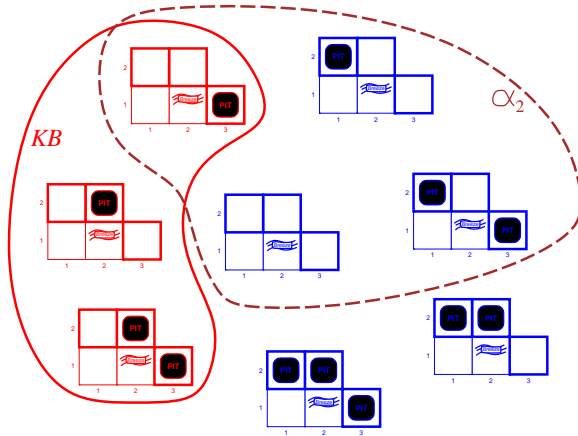
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan



$\alpha_2$  = "Kamar [2,2] aman",  $KB \not\models \alpha_2$





# Inference

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- **Inference** adalah proses/algorithm yang “menurunkan” fakta baru dari fakta-fakta lama.
- $KB \vdash_i \alpha$ : sentence  $\alpha$  bisa diturunkan dari  $KB$  oleh prosedur  $i$
- **Soundness**:  $i$  dikatakan *sound* jika untuk semua  $KB \vdash_i \alpha$ ,  $KB \models \alpha$  benar
- **Completeness**:  $i$  dikatakan *sound* jika untuk semua  $KB \models \alpha$ ,  $KB \vdash_i \alpha$  benar

## Preview!

Kita akan melihat sebuah logic, **first-order logic**, yang cukup ekspresif untuk menyatakan fakta-fakta, dan memiliki prosedur *inference* yang *sound* dan *complete*! Prosedur ini bisa menjawab semua pertanyaan yang jawabannya “terkandung” dalam  $KB$ .



# Outline

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- 1 Knowledge-based agent
- 2 Contoh: Wumpus World
- 3 Logic
- 4 Propositional logic**
- 5 Metode pembuktian
- 6 Ringkasan



# Propositional logic

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- **Propositional logic** adalah logic yang paling sederhana
- Sebuah *sentence* dinyatakan sebagai propositional symbol  $P_1, P_2$ , dst.

## Syntax

Jika  $S$  adalah kalimat,  $\neg S$  adalah kalimat (**negation**)

Jika  $S_1$  dan  $S_2$  adalah kalimat,  $S_1 \wedge S_2$  adalah kalimat (**conjunction**)

Jika  $S_1$  dan  $S_2$  adalah kalimat,  $S_1 \vee S_2$  adalah kalimat (**disjunction**)

Jika  $S_1$  dan  $S_2$  adalah kalimat,  $S_1 \Rightarrow S_2$  adalah kalimat (**implication**)

Jika  $S_1$  dan  $S_2$  adalah kalimat,  $S_1 \Leftrightarrow S_2$  adalah kalimat (**biconditional**)



# Semantics dari propositional logic

IKI30320

Kuliah 10

10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-based agent

Contoh: Wumpus World

Logic

Propositional logic

Metode pembuktian

Ringkasan

- Sebuah model memberi nilai *true/false* terhadap setiap *proposition*, mis:

$P_{1,2}$     $P_{2,2}$     $P_{3,1}$   
*true*   *true*   *false*

(Semua 8 model yang mungkin bisa dijabarkan)

## Aturan menentukan kebenaran sebuah kalimat terhadap $m$ :

$\neg S$	true iff	$S$	false		
$S_1 \wedge S_2$	true iff	$S_1$	true and	$S_2$	true
$S_1 \vee S_2$	true iff	$S_1$	true or	$S_2$	true
$S_1 \Rightarrow S_2$	true iff	$S_1$	false or	$S_2$	true
dkl.	false iff	$S_1$	true and	$S_2$	false
$S_1 \Leftrightarrow S_2$	true iff	$S_1 \Rightarrow S_2$	true and	$S_2 \Rightarrow S_1$	true

- Sebuah proses rekursif bisa mengevaluasi kalimat sembarang:  
 $\neg P_{1,2} \wedge (P_{2,2} \vee P_{3,1}) = \text{true} \wedge (\text{false} \vee \text{true}) = \text{true} \wedge \text{true} = \text{true}$



# Kalimat representasi Wumpus World

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- Semantics:
  - $P_{i,j} = \text{true}$  kalau ada lubang jebakan (*pit*) di  $[i, j]$ .
  - $B_{i,j} = \text{true}$  kalau ada hembusan angin (*breeze*) di  $[i, j]$ .
- Aturan main: *kamar di samping lubang jebakan ada hembusan angin*
  - $B_{1,1} \Leftrightarrow (P_{1,2} \vee P_{2,1})$
  - $B_{2,1} \Leftrightarrow (P_{1,1} \vee P_{2,2} \vee P_{3,1})$
- Hasil pengamatan (*percept*):
  - $\neg P_{1,1}$
  - $\neg B_{1,1}$
  - $B_{2,1}$



# Inference dengan truth-table

IKI30320

Kuliah 10

10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

Kita dapat membuktikan apakah  $KB \models \alpha_1$  menggunakan *truth table*. Ini adalah sejenis *model checking*.

$B_{1,1}$	$B_{2,1}$	$P_{1,1}$	$P_{1,2}$	$P_{2,1}$	$P_{2,2}$	$P_{3,1}$	$KB$	$\alpha_1$
false	false	false	false	false	false	false	false	true
false	false	false	false	false	false	true	false	true
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
false	true	false	false	false	false	false	false	true
false	true	false	false	false	false	true	true	true
false	true	false	false	false	true	false	true	true
false	true	false	false	false	true	true	true	true
false	true	false	false	true	false	false	false	true
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
true	true	true	true	true	true	true	false	false



# Prosedur inference dengan truth-table

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

**function** TT-ENTAILS?( $KB, \alpha$ ) **returns** *true* or *false*

*symbols*  $\leftarrow$  a list of the proposition symbols in  $KB$  and  $\alpha$   
**return** TT-CHECK-ALL( $KB, \alpha, symbols, []$ )

---

**function** TT-CHECK-ALL( $KB, \alpha, symbols, model$ ) **returns** *true* or *false*

**if** EMPTY?(*symbols*) **then**

**if** PL-TRUE?( $KB, model$ ) **then return** PL-TRUE?( $\alpha, model$ )  
    **else return** *true*

**else do**

$P \leftarrow \text{FIRST}(symbols); rest \leftarrow \text{REST}(symbols)$

**return** TT-CHECK-ALL( $KB, \alpha, rest, \text{EXTEND}(P, true, model)$ ) **and**  
        TT-CHECK-ALL( $KB, \alpha, rest, \text{EXTEND}(P, false, model)$ )

- *Inference* dengan menjabarkan seluruh *truth table* adalah *sound* dan *complete*.
- Untuk  $n$  symbol  $\rightarrow O(2^n)$ . NP complete ☹



# Logical equivalence

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

Dua kalimat **logically equivalent** jhjh mereka benar dalam model yang sama:  $\alpha \equiv \beta$  jhjh  $\alpha \models \beta$  dan  $\beta \models \alpha$

$(\alpha \wedge \beta)$	$\equiv$	$(\beta \wedge \alpha)$	commutativity of $\wedge$
$(\alpha \vee \beta)$	$\equiv$	$(\beta \vee \alpha)$	commutativity of $\vee$
$((\alpha \wedge \beta) \wedge \gamma)$	$\equiv$	$(\alpha \wedge (\beta \wedge \gamma))$	associativity of $\wedge$
$((\alpha \vee \beta) \vee \gamma)$	$\equiv$	$(\alpha \vee (\beta \vee \gamma))$	associativity of $\vee$
$\neg(\neg\alpha)$	$\equiv$	$\alpha$	double-negation elimination
$(\alpha \Rightarrow \beta)$	$\equiv$	$(\neg\beta \Rightarrow \neg\alpha)$	contraposition
$(\alpha \Rightarrow \beta)$	$\equiv$	$(\neg\alpha \vee \beta)$	implication elimination
$(\alpha \Leftrightarrow \beta)$	$\equiv$	$((\alpha \Rightarrow \beta) \wedge (\beta \Rightarrow \alpha))$	biconditional elimination
$\neg(\alpha \wedge \beta)$	$\equiv$	$(\neg\alpha \vee \neg\beta)$	de Morgan
$\neg(\alpha \vee \beta)$	$\equiv$	$(\neg\alpha \wedge \neg\beta)$	de Morgan
$(\alpha \wedge (\beta \vee \gamma))$	$\equiv$	$((\alpha \wedge \beta) \vee (\alpha \wedge \gamma))$	distributivity of $\wedge$ over $\vee$
$(\alpha \vee (\beta \wedge \gamma))$	$\equiv$	$((\alpha \vee \beta) \wedge (\alpha \vee \gamma))$	distributivity of $\vee$ over $\wedge$





# Validity dan Satisfiability

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- Sebuah kalimat **valid** jika ia *true* dalam **semua** model  
Mis.: “*Hari ini hujan atau hari ini tidak hujan*”.

## Deduction Theorem

$KB \models \alpha$  jika dan hanya jika  $(KB \Rightarrow \alpha)$  valid

- Sebuah kalimat **satisfiable** jika **ada** model di mana ia *true*  
Mis.: “*Hari ini hujan*”.
- Sebuah kalimat **unsatisfiable** jika **tidak ada** model di mana ia *true*  
Mis.: “*Hari ini hujan dan hari ini tidak hujan*”.

## Reductio ad absurdum (proof by contradiction)

$KB \models \alpha$  jika dan hanya jika  $(KB \wedge \neg \alpha)$  unsatisfiable



# Outline

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- 1 Knowledge-based agent
- 2 Contoh: Wumpus World
- 3 Logic
- 4 Propositional logic
- 5 Metode pembuktian**
- 6 Ringkasan



# Rules of Inference

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- Sebuah **inference rule** adalah pola *syntax* yang dapat menurunkan sebuah kalimat baru yang sah (*sound*).

- Rule yang paling terkenal adalah **modus ponens**:

$$\frac{\alpha \Rightarrow \beta, \alpha}{\beta}$$

- Contoh rule lain: **and elimination**:

$$\frac{\alpha \wedge \beta}{\alpha} \text{ dan } \frac{\alpha \wedge \beta}{\beta}$$

- Semua **logical equivalence** juga bisa dipakai sebagai inference rule.
- Untuk membuktikan  $KB \models \alpha$ , kita bisa mencari serangkaian inference rule yang hasil akhirnya adalah  $\alpha$ .
- Jika kita gunakan semua *inference rule* sebagai operator  $\rightarrow$  algoritma search biasa!
- Seringkali **bisa** jauh lebih efisien dari penjabaran truth-table  $\rightarrow$  tidak tergantung ukuran KB (**monotonicity**).



# Jenis-jenis metode pembuktian

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

Secara umum, ada 2 jenis:

- **Pengaplikasian *inference rule***
  - Hasilkan kalimat baru yang sah (*sound*) dari yang lama
  - Bukti (**proof**): serangkaian pengaplikasian *inference rule*  
Inference rule sebagai operator  $\rightarrow$  algoritma search.
  - Biasanya, kalimat harus diterjemahkan ke dalam sebuah **normal form**
- **Model checking**
  - Penjabaran *truth table* (eksponensial dalam  $n$ )
  - Backtracking lebih efisien, mis: algoritma DPLL
  - **Heuristic search** dalam *model space* (*sound* tapi *incomplete*), mis: min-conflicts hill-climbing



# Horn Form

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- Horn Form: KB = conjunction of Horn Clauses

- Horn Clause:

- Proposition symbol
- (Conjunction of symbols)  $\rightarrow$  symbol

Mis:  $C \wedge (B \Rightarrow A) \wedge (C \wedge D \Rightarrow B)$

- **Modus ponens** pada Horn Form (**complete** pada Horn KB):

$$\frac{\alpha_1, \dots, \alpha_n \quad , \quad \alpha_1 \wedge \dots \wedge \alpha_n \Rightarrow \beta}{\beta}$$

- Bisa digunakan dengan algoritma **forward chaining** atau **backward chaining**.



# Forward chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

## Ide dasar

Aplikasikan *rule* yang *premise*-nya diketahui benar dalam *KB*, tambah *conclusion* ke dalam *KB*, ulangi sampai *query* (*Q*) terbukti.

Mis:

$$P \Rightarrow Q$$

$$L \wedge M \Rightarrow P$$

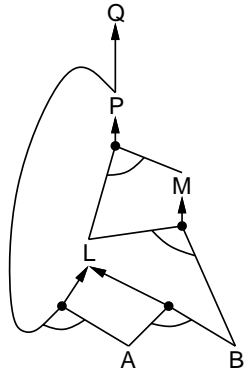
$$B \wedge L \Rightarrow M$$

$$A \wedge P \Rightarrow L$$

$$A \wedge B \Rightarrow L$$

*A*

*B*





# Algoritma Forward Chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

## Algorithm Forward Chaining

```
function PL-FC-ENTAILS?(KB, q) returns true or false
  local variables: count, a table, indexed by clause, initially the number of premises
                   inferred, a table, indexed by symbol, each entry initially false
                   agenda, a list of symbols, initially the symbols known to be true

  while agenda is not empty do
    p ← POP(agenda)
    unless inferred[p] do
      inferred[p] ← true
      for each Horn clause c in whose premise p appears do
        decrement count[c]
        if count[c] = 0 then do
          if HEAD[c] = q then return true
          PUSH(HEAD[c], agenda)

  return false
```



# Forward chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

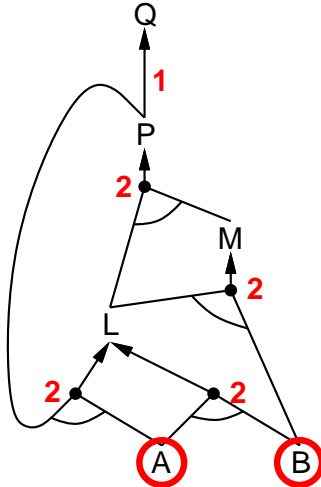
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan







# Forward chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

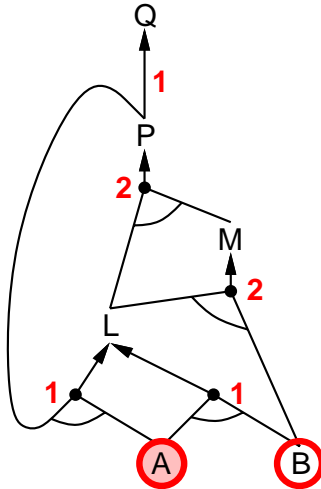
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan





# Forward chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

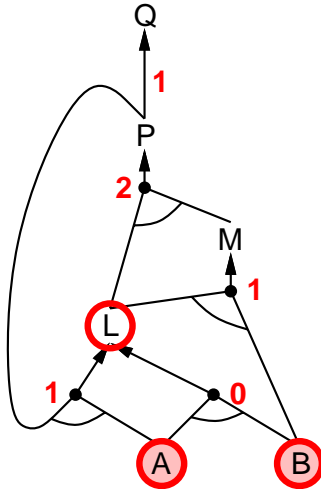
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan





# Forward chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

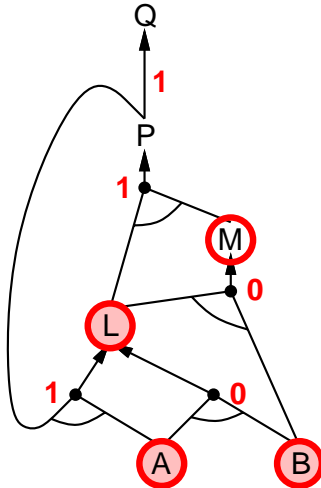
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan





# Forward chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

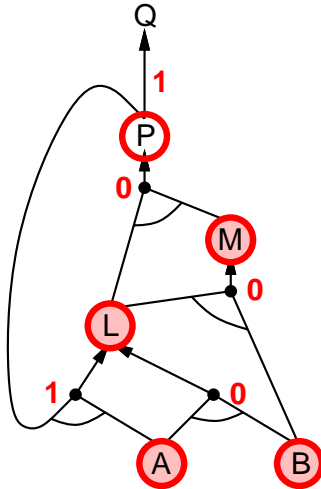
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan





# Forward chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

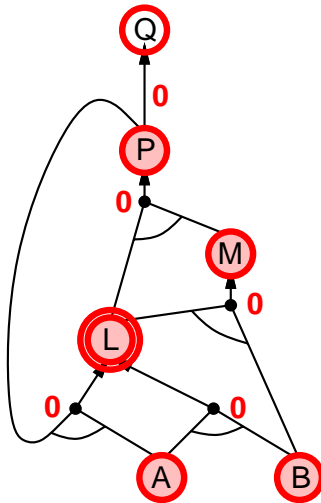
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan





# Forward chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

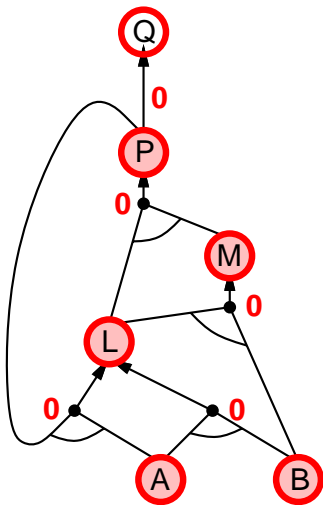
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan





# Forward chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

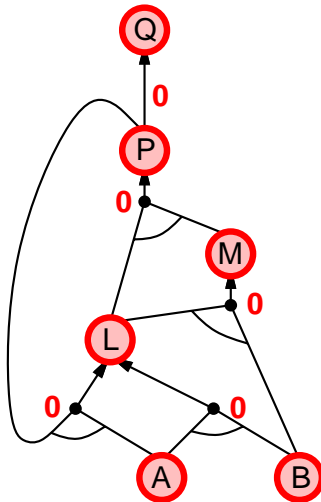
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan





# Backward chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

## Ide dasar

Untuk membuktikan query  $q$ : periksa jika  $q$  sudah diketahui, atau secara rekursif, buktikan semua *premise* rule yang *conclusion*-nya  $q$ .

- Hindari loop: periksa apakah subgoal yang baru sudah ada di *goal stack*
- Hindari mengulang pekerjaan: periksa apakah subgoal yang baru
  - sudah dibuktikan benar, atau
  - sudah dibuktikan salah.





# Backward chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

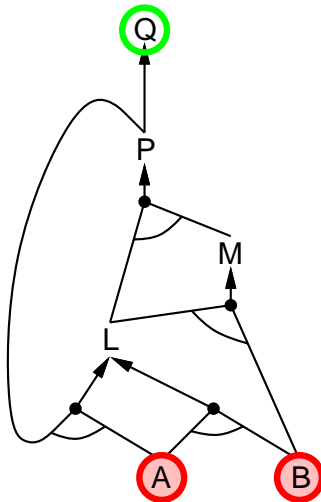
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan





# Backward chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

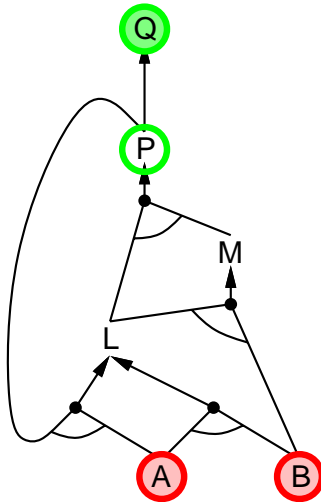
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan





# Backward chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

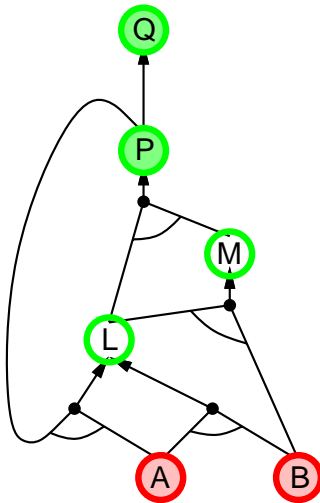
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan





# Backward chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

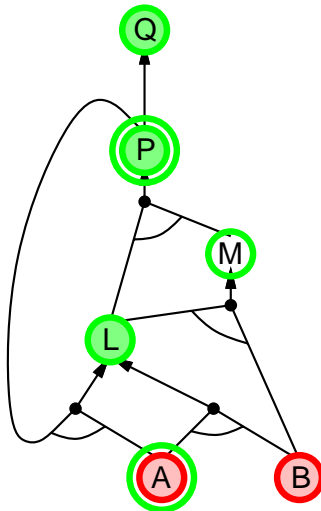
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan





# Backward chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

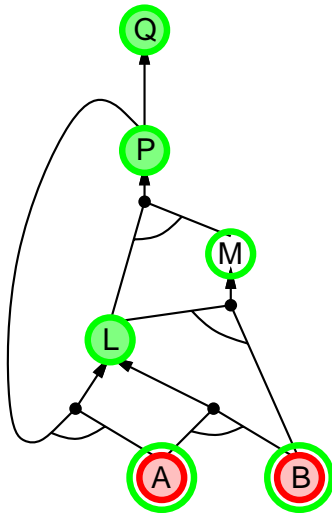
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan





# Backward chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

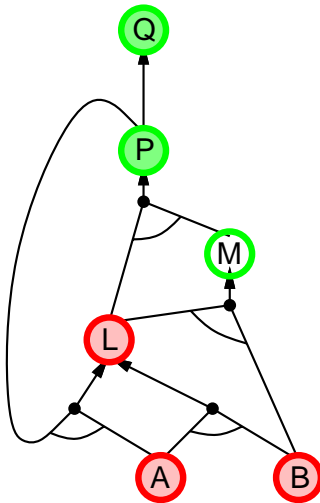
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan





# Backward chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

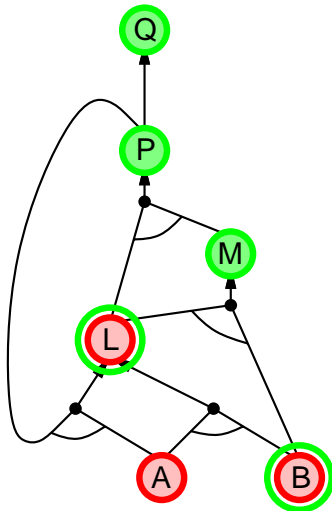
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan





# Backward chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

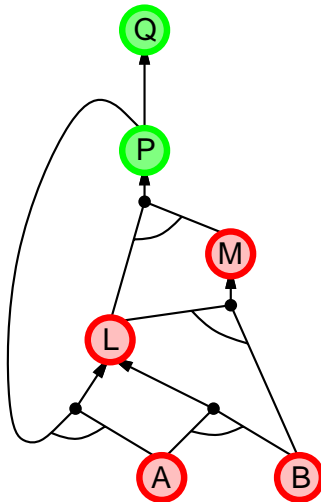
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan









# Backward chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

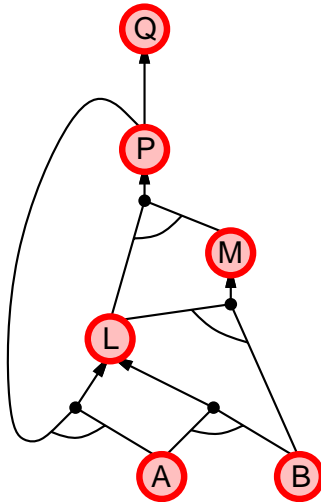
Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan





# Forward vs. Backward Chaining

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- **Forward Chaining** adalah pendekatan **data-driven**, *bottom-up* → pemrosesan informasi secara tak sadar (unconscious processing)  
Mis: mengenali obyek (indera penglihatan)
- Melakukan banyak usaha/kerja yang tidak relevan terhadap *goal*.
- **Backward chaining** adalah pendekatan **goal-driven**, *top-down* → pemrosesan informasi secara sadar (conscious processing)  
Mis: Bagaimana saya ke Bucharest? lulus kuliah cepat?
- Kompleksitas BC *bisa* jauh lebih kecil dari linear dalam ukuran *KB*.



## Ringkasan

- **Resolution** adalah *sound* dan *complete* untuk propositional logic!





# Pembuktian dengan *resolution*

- Untuk membuktikan apakah  $KB \models \alpha$ :
- Terjemahkan  $KB$  dan  $\alpha$  ke dalam CNF.
- Lakukan *proof by contradiction*:  
buktikan  $(KB \wedge \neg\alpha)$  adalah **unsatisfiable**

## Algoritma Resolution

**function** PL-RESOLUTION( $KB, \alpha$ ) **returns** *true* or *false*

*clauses*  $\leftarrow$  the set of clauses in the CNF representation of  $KB \wedge \neg\alpha$

*new*  $\leftarrow \{\}$

**loop do**

**for each**  $C_i, C_j$  **in** *clauses* **do**

*resolvents*  $\leftarrow$  PL-RESOLVE( $C_i, C_j$ )

**if** *resolvents* contains the empty clause **then return** *true*

*new*  $\leftarrow new \cup resolvents$

**if**  $new \subseteq clauses$  **then return** *false*

*clauses*  $\leftarrow clauses \cup new$



# Contoh Resolution

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

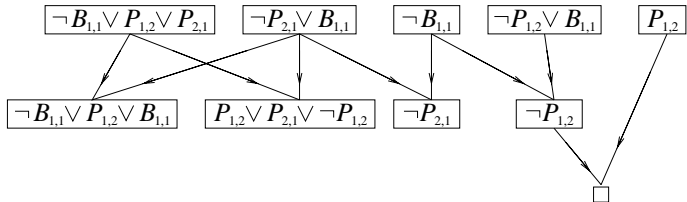
Metode  
pembuktian

Ringkasan

Contoh:

$$KB = (B_{1,1} \Leftrightarrow (P_{1,2} \vee P_{2,1})) \wedge \neg B_{1,1}$$

$$\alpha = \neg P_{1,2}$$





# Outline

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- 1 Knowledge-based agent
- 2 Contoh: Wumpus World
- 3 Logic
- 4 Propositional logic
- 5 Metode pembuktian
- 6 Ringkasan



# Ringkasan

IKI30320  
Kuliah 10  
10 Okt 2007

Ruli Manurung

Knowledge-  
based  
agent

Contoh:  
Wumpus  
World

Logic

Propositional  
logic

Metode  
pembuktian

Ringkasan

- Knowledge-based agent menggunakan **inference** pada **knowledge base** untuk menghasilkan informasi baru atau mengambil keputusan.
- Konsep-konsep dasar logika sebagai **knowledge representation language**:
  - **Syntax**: struktur kalimat bahasa formal
  - **Semantics**: arti kalimat sebagai kebenaran terhadap **model**
  - **Entailment**: menyimpulkan kalimat baru yang benar
  - **Inference**: proses menurunkan kalimat baru dari kalimat-kalimat lama
  - **Soundness**: proses menurunkan hanya kalimat yang di-entail
  - **Completeness**: proses menurunkan SEMUA kalimat yang di-entail
- **Forward, backward chaining**: proses inference *complete* dan *linear* untuk Horn form
- **Resolution**: inference rule yang *complete* untuk propositional logic
- Baca bab 7 buku Russell & Norvig