

Formal Model of Informatics Undergraduate Curriculum in Petri Nets

Aditya Bagoes Saputra ^{#1,3}, Thomas Anung Basuki ^{*2}, Sri Widowati ^{#3}

*#1 Department of Information Technology,
Jakarta Telkom Institute of Technology, Indonesia*

¹ adityabagoes@ittelkom-jkt.ac.id

**2Department of Electrical and Computer Engineering,
Curtin University Malaysia*

² thomas.basuki@curtin.edu.my

*#3 Department of Informatics, School of Computing
Telkom University Indonesia*

¹ masbagoes@telkomuniversity.ac.id

³ swd@telkomuniversity.ac.id

Abstract

The academic system in the undergraduate program of Informatics, Bandung Telkom Institute of Technology (now Telkom University) defines rules and procedures of curriculum and study program, evaluation of study, academic council, counseling, and registration. The curriculum and study program explain the courses. This paper develops formal model and model analysis of this curriculum in Petri nets. The result of this is the Petri nets model and its analysis to check properties based on the courses and curriculum. The course prerequisite model and curriculum follow the academic system, not deadlocked, and not reversible.

Keywords: formal methods, academic system, petri nets

I. PENDAHULUAN

Metode formal merupakan teknik matematis dan tools untuk spesifikasi, desain dan verifikasi suatu sistem. Sementara itu, sistem berbasis komputer (sistem digital) dapat melakukan kesalahan. Kesalahan tersebut dapat menimbulkan kerugian finansial sampai hilangnya nyawa. Sistem akademik juga merupakan sebuah sistem berdasarkan aturan dan prosedur yang mengikat terutama mahasiswa. Dengan kata lain, sistem akademik

secara menyangkut kehidupan mahasiswa dalam suatu institusi perguruan tinggi. Oleh karena itu, sistem akademik perlu diverifikasi dengan metode formal untuk mengetahui kemungkinan timbulnya masalah.

Aturan akademik pada perguruan tinggi secara umum terdiri dari satuan kredit semester (SKS), kurikulum, sidang akademik dan mata kuliah (MK). Kurikulum Program Studi (Prodi) di Strata 1 Teknik Informatika (S1 IF) Institut Teknologi Telkom (IT Telkom) tahun 2008 merupakan perubahan dari kurikulum tahun 2007. Status akreditasi S1 IF turun satu tingkat dari A, berdasarkan [1] Surat Keputusan (SK) bernomor 012/BAN-PT/AK-IX/S1/VII/2005 bertanggal 21 Juli 2005 menjadi B, berdasarkan SK bernomor 032 tahun 2010. Diketahui pula, pengambilan MK dalam proses registrasi dilakukan oleh mahasiswa dengan disetujui oleh dosen walinya melalui proses perwalian. Sementara itu, prasyarat MK untuk prodi ini tidak ditulis dalam buku panduan institusi IT Telkom. Hal ini dapat menimbulkan masalah jika mahasiswa mengambil MK yang prasyaratnya belum/sedang diambil dan dosen wali tetap menyetujui rencana studi tersebut. Di samping itu, sidang akademik tingkat II dan III tidak dilakukan tiap tahun yang menyebabkan tidak ada pengendalian dalam pengambilan MK berdasarkan tingkat.

Petri nets (PN) merupakan alat pemodelan formal terhadap sistem dengan menggunakan representasi secara visual. PN mempunyai fitur *firing sequence*, *reachability*, *useful and causality*, *concurrency*, *conflict*, *confusion*, *boundedness*, *deadlock*, dan *reversible*. Fitur tersebut dapat digunakan untuk memodelkan sistem akademik karena sistem akademik mempunyai karakteristik yaitu berupa sistem berdasarkan proses, pemenuhan persyaratan dalam berjalannya proses, ketergantungan antar proses.

II. PETRI NETS

Petri Nets (PN) merupakan disertasi dari Carl Adam Petri pada tahun 1962. Sebuah PN terdiri dari himpunan *place*, *transition*, *function* berbentuk busur (*arc*), dan token. Dalam PN, terdapat dua jenis simpul yaitu simpul aktif yaitu *transition* dan simpul pasif yaitu *place*. *Transition* direpresentasikan dengan persegi panjang, sedangkan *place* direpresentasikan dengan lingkaran. *Transition* berfungsi memodifikasi informasi, sedangkan *place* berfungsi untuk menyimpan informasi. *Function* menghubungkan dua jenis simpul dan tidak menghubungkan dua simpul sejenis. [2]

Function pada PN diklasifikasikan menjadi 3, yaitu *input function* yang direpresentasikan dengan busur beranak panah dari *place* ke *transition*; *output function* yang direpresentasikan dengan busur beranak panah dari *transition* ke *place*; serta *inhibitor function* yang direpresentasikan dengan busur berujung lingkaran dari *place* ke *transition*.

PN diklasifikasikan menjadi 3 kelas, yaitu PN level rendah, PN level menengah dan PN level tinggi. PN level rendah digunakan untuk melakukan penyelidikan hal-hal mendasar dari suatu sistem. Contoh dari PN level rendah adalah *Elementary Net* (EN) dan *Elementary Net System* (ENS). PN level menengah digunakan untuk menggali lebih dalam fasilitas dari ENS untuk mendapatkan representasi yang lebih *compact*. Contoh dari PN level menengah adalah *Place/Transition System*. Terakhir, PN level tinggi digunakan dalam pembuatan representasi yang menggunakan aljabar dan logika untuk PN yang cocok untuk aplikasi dunia nyata. Contoh dari PN level tinggi adalah *Coloured Petri Nets*, *Stochastic Petri Nets*, dan *Timed Petri Nets*. [2,3]

A. Elementary Net [2]

EN merupakan tiga tupel $N = \{P, T, F\}$ yang memenuhi:

1. P dan T adalah himpunan berhingga dengan $P \cap T = \emptyset$
2. $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$
3. $\forall t \in T \exists p, q \in P ((p, t) \in F \wedge (t, q) \in F)$
4. $\forall t \in T \forall p, q \in P (((p, t) \in F \wedge (t, q) \in F) \Rightarrow p \neq q)$

EN terdiri dari tiga unsur, yaitu himpunan *place* P , himpunan *transition* T , dan himpunan *function* F . Himpunan *place* dan *transition* merupakan himpunan berhingga yang saling lepas. *Function* terdiri dari fungsi input dan inhibitor, serta fungsi output. Untuk setiap *transition*, selalu ada input, inhibitor dan output yang melalui *transition* tersebut. Untuk setiap transisi, tidak ada input, inhibitor dan output yang sama melalui *transition* tersebut.

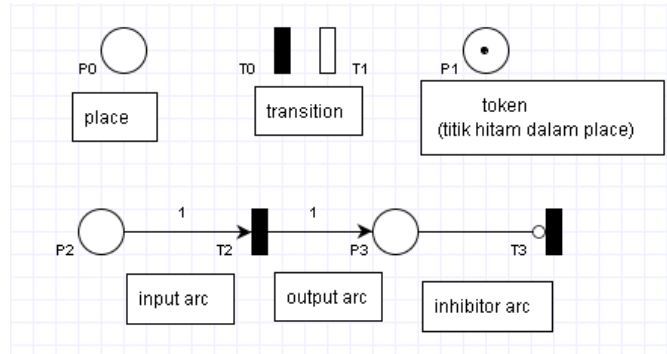


Fig. 1. Elemen Petri Nets

Misal terdapat EN $N = \{P, T, F\}$ dengan $X = P \cup T$. Himpunan input dari x dinotasikan dengan *x . Himpunan input didefinisikan sebagai ${}^*x = \{y \in X | (y, x) \in F\}$. Sementara itu, himpunan output dari x yang dinotasikan dengan x^* , himpunan output didefinisikan sebagai $x^* = \{y \in X | (x, y) \in F\}$. Ketetanggaan (*neighbourhood*) dari x , yang dinotasikan dengan $nbh(x)$ didefinisikan sebagai $nbh(x) = {}^*x \cup x^*$. Jika $y \subseteq X$, maka ${}^*Y = \bigcup_{x \in Y} {}^*x$ dan $Y^* = \bigcup_{x \in Y} x^*$.

Transitive closure dari F yang dinotasikan dengan F^+ didefinisikan secara rekursif sebagai berikut:

1. $\forall x, y \in X ((x, y) \in F \Rightarrow (x, y) \in F^+)$
2. $\forall x, y, z \in X ((x, y) \in F^+ \wedge (y, z) \in F^+ \Rightarrow (x, z) \in F^+)$
3. Tidak ada yang lain di dalam F^+

Reflexive and transitive closure dari F yang dinotasikan dengan F^* didefinisikan sebagai $F^* = F^+ \cup \{(x, x) | x \in X\}$. EN dapat memiliki beberapa properti, seperti dijelaskan berikut ini:

1. *Acyclic*
 N bersifat *acyclic* jika dan hanya jika $\forall x \in X ((x, x) \notin F^+)$
2. *P-simple*
 N bersifat *P-simple* jika dan hanya jika $\forall x, y \in P (({}^*x = {}^*y) \wedge (x^* = y^*) \Rightarrow (x = y))$
3. *T-simple*
 N bersifat *T-simple* jika dan hanya jika $\forall s, t \in T ((s^* = t^*) \wedge (s = t) \Rightarrow (s = t))$
4. Terhubung
 N terhubung (tidak memiliki *place* yang terisolasi) jika dan hanya jika $\forall x \in X (nbh(x) \neq \emptyset)$

Misal terdapat 2 buah EN $N = \{P, T, F\}$ dan $N' = \{P', T', F'\}$. Menurut [13], dua PN itu disebut isomorfisme- (α, β) jika ada dua fungsi bijeksi $\alpha: P \rightarrow P'$ dan $\beta: T \rightarrow T'$ demikian sehingga untuk setiap $p \in P$ dan $t \in T$ memenuhi:

1. $(p, t) \in F$ jika dan hanya jika $(\alpha(p), \beta(t)) \in F'$
2. $(t, p) \in F$ jika dan hanya jika $(\beta(t), \alpha(p)) \in F'$

EN merupakan tiga tupel $N = \{P, T, F\}$ yang memenuhi:

1. P dan T adalah himpunan berhingga dengan $P \cap T = \emptyset$
2. $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$
3. $\forall t \in T \exists p, q \in P ((p, t) \in F \wedge (t, q) \in F)$
4. $\forall t \in T \forall p, q \in P (((p, t) \in F \wedge (t, q) \in F) \Rightarrow p \neq q)$

EN terdiri dari tiga unsur, yaitu himpunan *place* P , himpunan *transition* T , dan himpunan *function* F . Himpunan *place* dan *transition* merupakan himpunan berhingga yang saling lepas. *Function* terdiri dari fungsi input dan inhibitor, serta fungsi output. Untuk setiap *transition*, selalu ada input, inhibitor dan output yang melalui *transition* tersebut. Untuk setiap transisi, tidak ada input, inhibitor dan output yang sama melalui *transition* tersebut.

Misal terdapat EN $N = \{P, T, F\}$ dengan $X = P \cup T$. Himpunan input dari x dinotasikan dengan *x . Himpunan input didefinisikan sebagai ${}^*x = \{y \in X | (y, x) \in F\}$. Sementara itu, himpunan output dari x yang dinotasikan dengan x^* , himpunan output didefinisikan sebagai $x^* = \{y \in X | (x, y) \in F\}$.

Ketetanggaan (*neighbourhood*) dari x , dinotasikan dengan $nbh(x)$ didefinisikan sebagai $nbh(x) = {}^*x \cup x^*$. Jika $y \subseteq X$, maka ${}^*Y = \bigcup_{x \in Y} {}^*x$ dan $Y^* = \bigcup_{x \in Y} x^*$.

Misal sebuah EN $N = \{P, T, F\}$ dengan $X = P \cup T$. *Transitive closure* dari F yang dinotasikan dengan F^+ didefinisikan secara rekursif sebagai berikut:

1. $\forall x, y \in X ((x, y) \in F \Rightarrow (x, y) \in F^+)$
2. $\forall x, y, z \in X ((x, y) \in F^+ \wedge (y, z) \in F^+ \Rightarrow (x, z) \in F^+)$
3. Tidak ada yang lain di dalam F^+

Sementara itu, *reflexive and transitive closure* dari F yang dinotasikan dengan F^* didefinisikan sebagai $F^* = F^+ \cup \{(x, x) \mid x \in X\}$.

B. Elementary Net System [2, 3]

Elementary Net System (ENS) merupakan empat tupel $S = \{P, T, F, M_{in}\}$ yang memenuhi:

1. P dan T adalah himpunan berhingga dengan $P \cap T = \emptyset$
2. $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$
3. $\forall t \in T \exists p, q \in P ((p, t) \in F \wedge (t, q) \in F)$
4. $\forall t \in T \forall p, q \in P (((p, t) \in F \wedge (t, q) \in F) \Rightarrow p \neq q)$
5. $M_{in}: P \rightarrow \mathbb{N}$

Dari definisi tersebut, ENS merupakan EN dengan *initial marking* (penanda awal) M_{in} . *Initial marking* merupakan fungsi yang memetakan setiap *place* p ke suatu bilangan asli \mathbb{N} . *Initial marking* adalah *token* yang ditempatkan pada suatu *place* sebagai representasi dari *local state*.

Misal ENS $S = \{P, T, F, M_{in}\}$ dan $M, M_1, M_2 \subseteq P$ adalah *marking* dari S . *Transition* t *enabled* di M , jika ${}^*t \subseteq M$ dan $t^* \cap M = \emptyset$. *Transition* t *fire* (ditembakkan) dari M_1 ke M_2 jika dan hanya jika t *enabled* di M_1 dan $M_2 = (M_1 - {}^*t) \cup t^*$. Prose *firing* tersebut dinotasikan $M_1 [t > M_2$.

Misal $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n \in T^*$ dengan $n \geq 0$ dan M, H merupakan dua *marking* dari S . *Firing sequence* didefinisikan:

1. *Transition* $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ *fire* dari M ke H jika terdapat *marking* $M_0, M_1, M_2, \dots, M_n \subseteq P$ dengan $M = M_0$ dan $M_n = H$ sehingga $M_{i-1} [t_i > M_i$ untuk semua $i \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$. Dinotasikan $M [t_1 \dots t_n > H$.
2. $x \in T^*$ *enabled* di M jika ada H demikian sehingga $M [x > H$. Dinotasikan $x \text{ con } M$.
3. $x \in T^*$ merupakan *firing sequence* dari M jika $x \text{ con } M$. Himpunan dari semua *firing sequence* dari M dinotasikan $FS(M)$.

Misal ENS $S = \{P, T, F, M_{in}\}$ dengan M adalah *marking* dan t merupakan sebuah *transition*. M merupakan *reachable marking* dari S jika ada sebuah $x \in FS(M)$ dengan $M_{in} [x > M$. Himpunan dari semua *reachable marking* dari S dinotasikan \mathcal{M}_S .

Misal ENS $S = \{P, T, F, M_{in}\}$ dengan M adalah *marking* dan t merupakan sebuah *transition*. *transition* t merupakan *useful transition* dari S jika ada sebuah *reachable marking* M dari S demikian sehingga t *enabled* di M . Himpunan dari semua *useful transition* dari S dinotasikan $use_S(T)$.

Misal ENS $S = \{P, T, F, M_{in}\}$ dengan M adalah *marking* dan t merupakan sebuah *transition*. *Transition* t merupakan *live transition* dari S jika untuk setiap *reachable marking* M dari S , ada $x \in T^*$ demikian sehingga $xt \text{ con } M$.

Misal ENS $S = \{P, T, F, M_{in}\}$ dengan M adalah *marking* dan t_1 dan t_2 merupakan *transition*. *transition* t_1, t_2 bersifat *causality* jika $t_1 t_2 \text{ con } M$ dan $t_1 \cdot \cap t_2 \neq \emptyset$.

Misal terdapat ENS $S = \{P, T, F, M_{in}\}$ dengan M merupakan sebuah *marking* serta t_1 dan t_2 merupakan *transition*. *Transition* t_1 dan t_2 bersifat *concurrent* jika $\{t_1, t_2\} \text{ con } M$, dengan $\{t_1, t_2\}$ merupakan bagian dari T .

Misal terdapat ENS $S = \{P, T, F, M_{in}\}$. Misal $M \in \mathcal{M}_S$ dan $t \in T$ *enabled* di M . Himpunan *conflict* dari t di M dinotasikan $\text{cfi}(t, M)$ merupakan himpunan $\{t' \in T | t' \text{ enabled di } M \text{ dan } \neg\{t, t'\} \text{ con } M\}$

Misal terdapat ENS $S = \{P, T, F, M_{in}\}$, $M \in \mathcal{M}_S$ dan $t_1, t_2 \in T$ *enabled* di M . tiga tupel $\{C, t_1, t_2\}$ disebut *confusion* jika $t_1 \neq t_2$, $\{t_1, t_2\} \text{ con } M$ dan $\text{cfi}(t, M) \neq \text{cfi}(t, M')$ dengan $M[t_2 > M']$. Dengan demikian, S *confused* di M .

Sebuah ENS S merupakan *sequential* jika $\#M = 1$ untuk semua $M \in \mathcal{M}_S$ dengan $\#M$ didefinisikan sebagai kardinalitas himpunan *place* dengan *token* berjumlah satu.

Sebuah ENS S merupakan *concurrency-free* jika tidak ada $M \in \mathcal{M}_S$ dan $t_1, t_2 \in T_S$ demikian sehingga $\{t_1, t_2\} \text{ con } M$.

C. Place/Transition Petri Nets [2]

Place/Transition Petri Nets (p/t-nets) didefinisikan sebagai perluasan ENS dengan setiap *places* dapat memiliki lebih dari satu *token*. p/t-nets dinotasikan dengan $N = \{P, T, F, M\}$ dengan P merupakan himpunan *place*, T merupakan himpunan *transition*, dan F merupakan fungsi input, inhibitor dan output dan M merupakan *marking*. *Marking* didefinisikan sebagai fungsi pemetaan $m : P_N \rightarrow \mathbb{N}$.

Misal terdapat p/t-nets $N = \{P, T, F, M\}$ dengan $t \in T$. *Transition* t *enabled* pada *marking* M jika semua *place* pada t termasuk dalam M . Jika *transition* t *enabled*, maka *transition* tersebut dapat di-fire-kan. *Dead marking* (*marking* yang mati) didefinisikan sebagai *marking* tanpa *enabled transition*. Berikut ini hasil proses *firing* yang mungkin diperoleh dari *transition* t dengan melihat perubahan *marking*.

$$m'(p) = \begin{cases} m(p) - 1; & \text{jika } s \in \bullet t - t \bullet \\ m(p) + 1; & \text{jika } s \in t \bullet - \bullet t \\ m(p) & \end{cases}$$

dengan $m(p)$ merupakan *marking* pada *place* $p \in P$.

Sebuah *marked net* didefinisikan sebagai sebuah p/t-nets dengan *initial marking*. Sebuah *place* p disebut *b-bounded* jika $m(p) \leq b$ untuk setiap *reachable marking* m . Sebuah *finite marked net* disebut *bounded* jika dan hanya jika ada sebuah batas b demikian sehingga setiap *place* *b-bounded*.

Sebuah *transition* t dikatakan *dead* (mati) pada sebuah *marking* m jika *transition* tersebut tidak *enabled* pada semua *reachable marking* dari M . Sebuah *marked net* dikatakan *live* (hidup) jika tidak ada *dead transition* untuk semua *reachable marking*. Sebuah *marked net* dikatakan bebas *deadlock* jika tidak ada *reachable marking* yang mati. Sebuah *live marked net* dengan minimal sebuah *transition* dikatakan bebas *deadlock*.

Sebuah *marked net* dikatakan *reversible* jika *initial marking*-nya dapat dicapai dari setiap *reachable marking*. Sebuah *marked net* yang *reversible* dikatakan bebas *deadlock* jika dan hanya jika *initial marking*-nya tidak mati.

II. MENENTUKAN PRASYARAT MK

Prasyarat MK merupakan pedoman untuk mengambil MK terutama berkenaan tentang persyaratan sebelum pengambilan MK, persyaratan pengambilan MK yang diambil bersamaan dan MK yang diambil berikutnya setelah mengambil suatu MK. Tujuan model ini adalah: membuat prasyarat MK dalam bentuk tabel dan pohon, membuat ENS prasyarat MK; menganalisis ENS prasyarat MK.

Pembuatan model prasyarat MK memerlukan data mengenai rumpun MK, MK beserta MK *pre-requisite*, MK *co-requisite*, dan MK *post-requisite*-nya. Rumpun ilmu dan MK dijelaskan pada [4,5].

MK *pre-requisite* didefinisikan sebagai himpunan MK yang harus diambil sebelum mengambil suatu MK. MK *co-requisite* adalah himpunan MK yang dapat diambil secara bersamaan pada satu semester. MK *post-requisite* didefinisikan sebagai himpunan MK yang dapat diambil setelah mengambil suatu MK. Dengan kata lain, MK *pre-requisite* adalah kebalikan dari MK *post-requisite*.

Data-data mengenai prasyarat MK tersebut dapat diperoleh dengan studi literatur pada [5], meskipun tidak tertulis secara eksplisit di buku tersebut, wawancara kepada dosen pengampu MK. Data prasyarat MK dikelompokkan menjadi 2, yaitu prasyarat MK wajib dan MK pilihan dan pilihan bebas. Data tersebut ditampilkan dalam Lampiran 2 Prasyarat Mata Kuliah. Legenda dari lampiran tersebut ditampilkan pada tabel berikut.

TABEL I
WARNA DAN RUMPUN ILMU

Warna	Rumpun Ilmu
	Matematika
	Umum
	Fisika
	Teknik Industri
	Sains Komputer
	Ketrampilan Kerja
	Rekayasa Perangkat Lunak
	Sistem Informasi
	Teknik Elektro
	Teknik Telekomunikasi

Pohon dan model prasyarat MK dibentuk khusus untuk MK wajib karena MK tersebut selalu terjadwal dalam kurikulum. Pohon prasyarat MK menggunakan bentuk pohon dengan MK sebagai simpul berbentuk kotak yang berisi nama MK. Kotak tersebut diberi warna sesuai dengan tabel 1. Simpul yang berisi MK yang tidak memiliki MK *pre-requisite* berada di barisan paling atas dan dikelompokkan berdasarkan rumpun ilmu. MK *post-requisite*-nya berada di bawah suatu MK dengan dihubungkan dengan anak panah dari MK ke MK *post-requisite*-nya. Sementara itu, MK yang memiliki hubungan *co-requisite* diletakkan dalam posisi sejajar dan diberi garis yang menghubungkannya. Pohon prasyarat MK ditampilkan sebagai berikut.

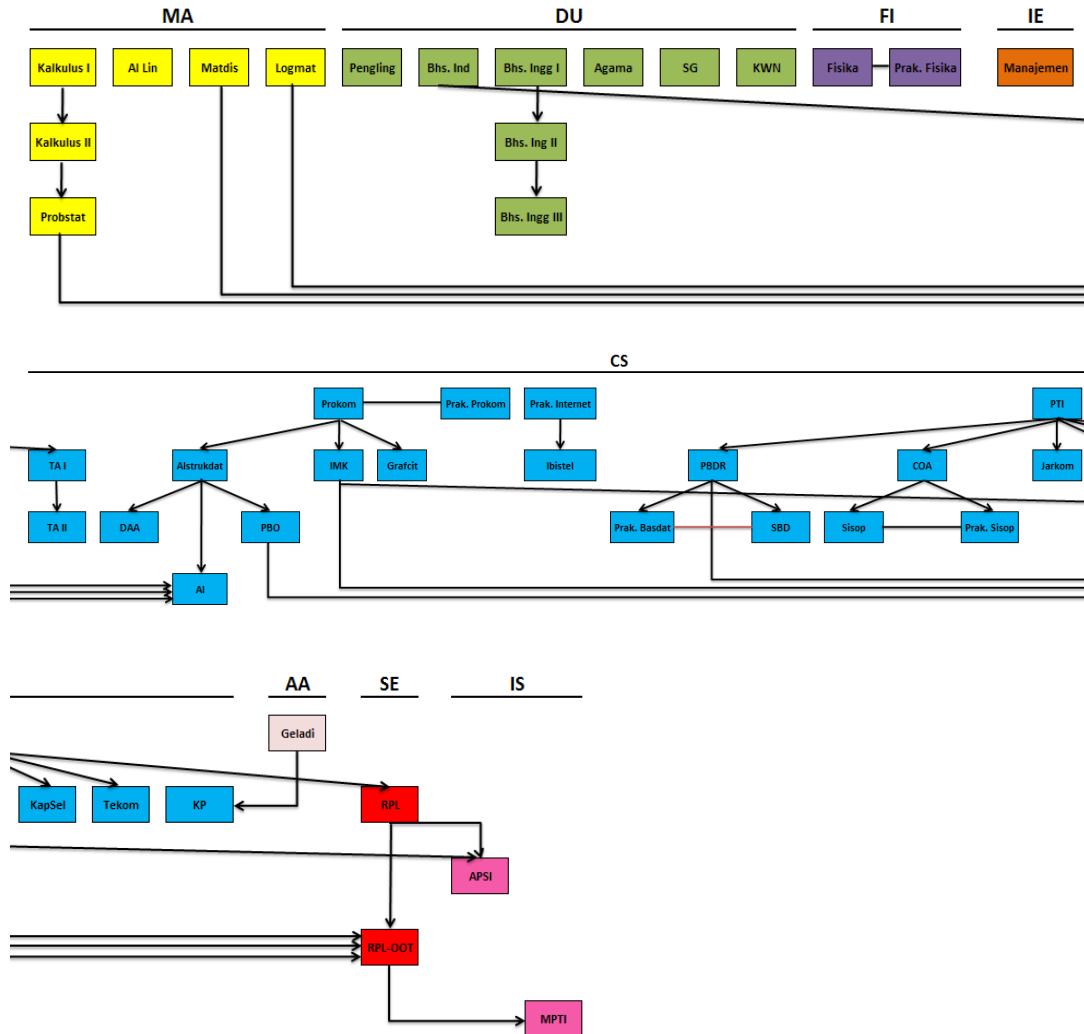


Fig. 2. Pohon Prasyarat MK

Model PN untuk prasyarat MK berbentuk ENS. Misal ENS Prasyarat MK dinotasikan dengan $S = \{P, T, F, M_{in}\}$. Himpunan *place* P merepresentasikan simpul pasif, yaitu penyimpan informasi untuk mengambil MK, sedangkan himpunan *transition* T merepresentasikan simpul aktif, yaitu proses pengambilan MK. Himpunan *function* F merepresentasikan hubungan pengambilan MK dengan informasi pengambilan MK. *Function* digunakan untuk menunjukkan hubungan antar MK antara lain hubungan *pre-requisite* dan *post-requisite*. Himpunan *initial marking* M_{in} merupakan himpunan *place* yang diberikan *token*. ENS S memiliki $M_{in} = \{\}$. *Token* di dalam *place* merepresentasikan *local state* bahwa suatu MK telah diambil dan dapat mengambil MK lain yang di-*enabled* melalui *place* tersebut. *Enabled transition* merepresentasikan MK yang dapat diambil. MK tanpa MK *pre-requisite* direpresentasikan dengan *enabled transition*.

Transition berwarna merah menunjukkan *enabled transition*, sementara berwarna hitam berarti tidak *enabled*. *Place* pProbstat tidak berisi *token* merepresentasikan bahwa tidak dapat mengambil MK Probabilitas dan Statistika, sedangkan *place* pKalkulusII berisi 1 *token* merepresentasikan bahwa MK Kalkulus I sudah diambil dan dapat mengambil MK Kalkulus II. *Function* (takeKalkulusII,pProbstat) berbobot 1 menunjukkan

The diagram illustrates a Petri net for a course sequence. It features two places, $pKalkulusII$ and $pProbstat$, and two transitions, $takeKalkulusII$ and $takeProbstat$. The sequence starts with a box labeled "Matematika" which leads to the $takeKalkulusII$ transition. This transition has an incoming edge from a red bar and an outgoing edge to the $pKalkulusII$ place. The $pKalkulusII$ place has an outgoing edge to the $takeKalkulusII$ transition. The $takeKalkulusII$ transition has an outgoing edge to the $pProbstat$ place. The $pProbstat$ place has an outgoing edge to the $takeProbstat$ transition. The $takeProbstat$ transition has an outgoing edge to a black bar. There are four red bars on the left side of the diagram, each connected to a transition: $takeKalkulusI$, $takeAllIn$, $takeMatdis$, and $takeLogmat$. Each transition has an incoming edge from a red bar and an outgoing edge to a place. The $takeKalkulusI$ transition has an outgoing edge to the $pKalkulusII$ place. The $takeAllIn$ transition has an outgoing edge to the $pProbstat$ place. The $takeMatdis$ transition has an outgoing edge to the $pProbstat$ place. The $takeLogmat$ transition has an outgoing edge to the $pProbstat$ place.

Fig. 3. ENS S Prasyarat MK pada Rumpun Ilmu Matematika

Pembuatan model kurikulum dibuat dengan p/t-nets. Tiap MK terhubung dengan MK *pre-requisite* dan *co-requisite*-nya. MK tanpa MK *pre-requisite* berada di bagian paling kiri, sedangkan MK *co-requisite* berada posisi sejajar dihubungkan dengan anak panah *co-requisite*. MK yang mempunyai MK *pre-requisite* berada di sebelah kanan MK *pre-requisite* dan dihubungkan dengan *function*. Kurikulum dapat dilihat dari *firing sequence* p/t-nets.

Pemodelan kurikulum dibuat dengan menggunakan p/t-nets. p/t-nets Kurikulum dibuat dengan memperhatikan semester, kuota SKS, prasyarat MK, jumlah SKS. Dengan melakukan *refinement* pada ENS S prasyarat MK, pemodelan kurikulum dijelaskan sebagai berikut. Misal p/t-nets $N = \{P, T, F, M\}$ merupakan p/t-nets kurikulum, maka himpunan *place* P merupakan simpul pasif yang berisi informasi, terdiri dari informasi MK, semester, kuota SKS, dan total SKS, himpunan *transition* T merupakan simpul aktif yang memodifikasi informasi terdiri dari pengambilan MK dan pemilihan kuota SKS, himpunan *function* F menghubungkan MK, pengambilan MK dan informasi MK; pemilihan kuota SKS dan kuota SKS serta semester; pengambilan MK dan total SKS dan himpunan *marking* M merupakan himpunan *place* yang diberi sejumlah *token*. Himpunan *marking* $M = \{\}$. Berikut ini elemen dan ilustrasi p/t-nets N kurikulum.

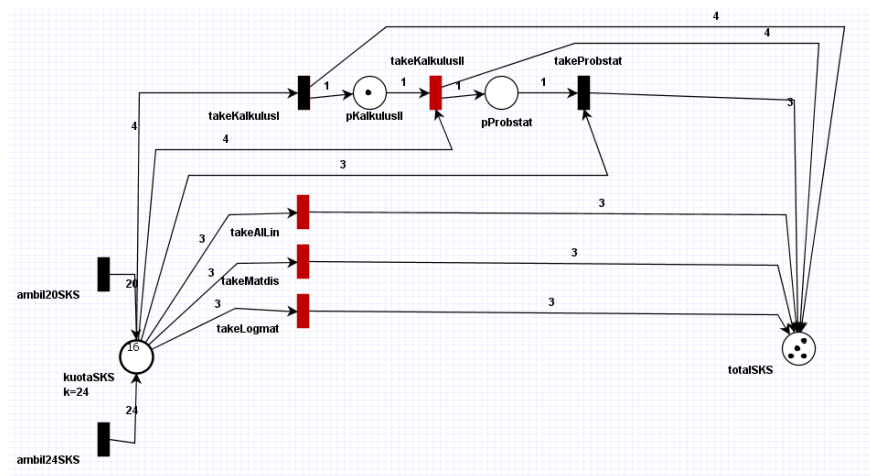
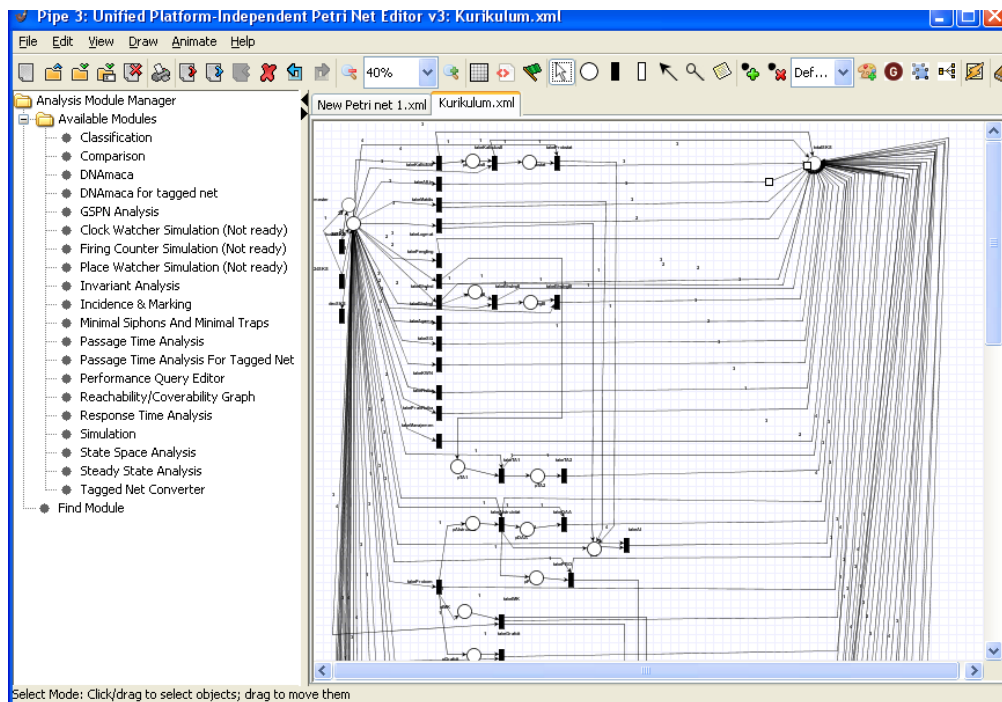


Fig. 4. p/t-nets N Kurikulum pada Rumpun Ilmu Matematika

Place kuotaSKS berisi 16 *token* merepresentasikan sisa kuota SKS yang dapat digunakan untuk mengambil MK berjumlah 16 SKS. *Place* kuotaSKS mempunyai atribut $k=24$ merepresentasikan bahwa *place* tersebut dapat menampung maksimal 24 *token*, sesuai dengan kuota maksimal SKS yaitu 24 SKS. *Place* totalSKS berisi 4 *token* merepresentasikan bahwa total SKS yang telah diambil sebanyak 4 SKS, yaitu hasil pengambilan MK Kalkulus I. *Enabled transition* merepresentasikan MK yang saat itu dapat diambil yaitu MK Kalkulus II, Aljabar Linear, Matematika Diskret, dan Logika Matematika. *Function* (takeAllLin,totalSKS) berbobot 3 merepresentasikan bahwa jika dilakukan *firing* kuotaSKS[takeAllLin>totalSKS, maka *place* kuotaSKS akan kehilangan 3 *token* dan *place* totalSKS akan bertambah 3 *token*.

Implementasi model kurikulum menggunakan *tools* PIPE3 dan dibentuk dalam sebuah p/t-nets. Analisis model kurikulum meliputi analisis kurikulum, analisis p/t-nets dengan menggunakan modul pada PIPE3 dan. Analisis kurikulum digunakan untuk mengetahui kesesuaian penetapan MK dalam semester. Analisis dengan modul PIPE3 yaitu *simulation*. Analisis berdasarkan landasan teori meliputi *firing sequence*, *reachability*, *usefulness*, *liveness*, *causality*, *concurrency*, *conflict*, *confusion*, *boundedness*, *deadlock*, serta *reversible*.



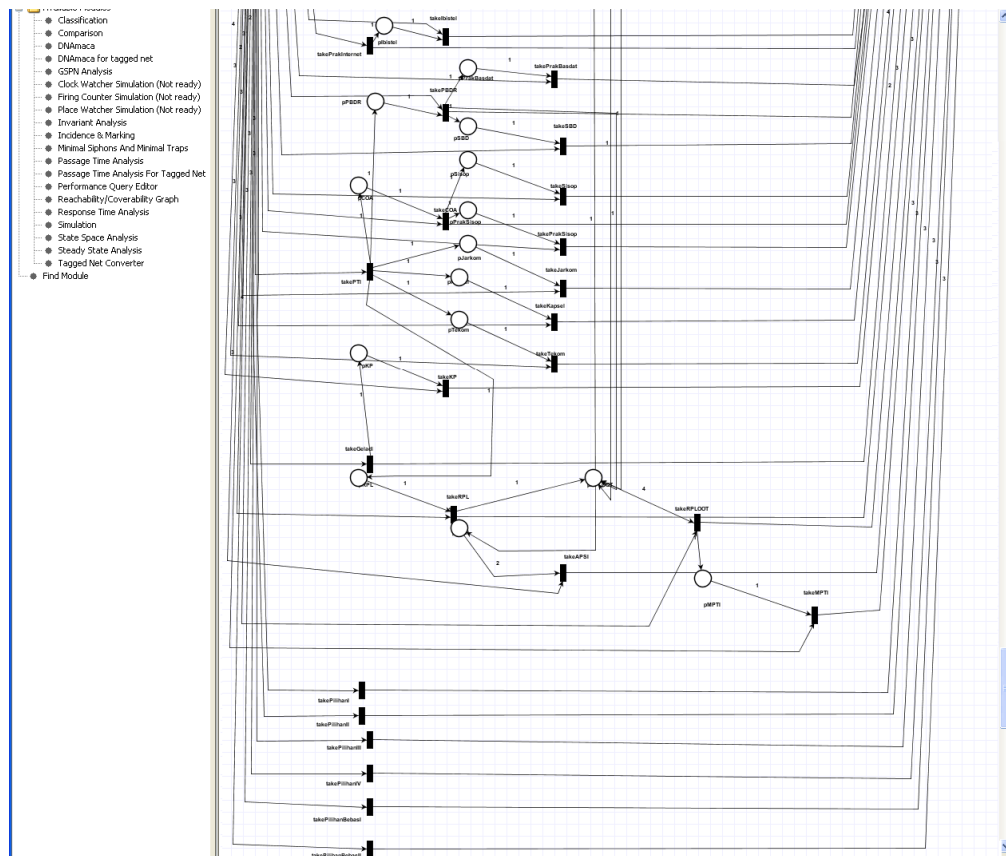


Fig. 5. Model p/t-nets Kurikulum N

Dari segi model, p/t-nets N dapat merepresentasikan pengambilan MK sesuai dengan prasyarat MK, SKS, kuota SKS, semester berjalan, masa studi dan total SKS. Dari sisi proses, kurikulum masa studi 4 tahun dan 3,5 tahun yang dianalisis. Berdasarkan prasyarat MK yang dimodelkan, dalam kurikulum 4 tahun dan 3,5 tahun, terdapat MK Geladi yang tidak sesuai dengan prasyarat karena MK Geladi harus diambil sebelum mengambil MK Kerja Praktek (pada kurikulum 4 tahun, MK Kerja Praktek di semester 7, MK Geladi di semester 8 dan pada kurikulum 3,5 tahun, kedua MK tersebut diambil pada semester 7).

TABEL 2
SIMULASI P/T-NETS N KURIKULUM

Parameter		
Firing	100	
replication	5	
Place	Average number of tokens	95% confidence interval (+/-)
kuotaSKS	10.87129	0.47651
pAI	3.20792	0.99265
pAlstrukdat	0.0198	0.40809
pAPSI	0.49505	0.28111
pBhsIngII	0.42574	0.59077
pBhsIngIII	0.49505	0.39834
pCOA	0.27723	0.37133

pDAA	0.44554	0.30525
pGrafcit	0.07921	0.46905
plbistel	0.44554	0.40934
pIMK	0.93069	0.51585
pJarkom	0.24752	0.25551
pKalkulusII	0.72277	0.55574
pKapsel	0.26733	0.35243
pKP	0.29703	0.39834
pMPTI	0	0
pPBDR	0.46535	0.42879
pPBO	0.59406	0.37218
pPrakBasdat	0.21782	0.37516
pPrakSisop	0.14851	0.15001
pProbst	0.62376	0.4433
pRPL	0.41584	0.56047
pRPLOOT	1.25743	1.06349
pSBD	0.09901	0.26709
pSisop	0.63366	0.46531
pTA1	0.21782	0.61349
pTA2	0.29703	0.46434
pTekom	0.16832	0.53708
totalSKS	110.61386	10.60783

Untuk *place* pAI dan pRPLOOT mempunyai rata-rata jumlah *token* lebih dari 1 karena *place* tersebut mempunyai batas maksimal *token* berturut-turut 4 dan 2. Untuk *place* kuotaSKS mempunyai batas maksimal *token* sebanyak 24. Untuk *place* totalSKS tidak mempunyai batas maksimal *token*. Untuk *place* pMPTI mempunyai rata-rata jumlah *token* 0. Hal tersebut merepresentasikan bahwa dalam lima kali percobaan, setelah dilakukan 100 kali *firing*, jumlah *token* pada *place* tersebut selalu 0.

Melihat p/t-nets N Kurikulum, terdapat banyak urutan *firing* yang mungkin. Oleh karena itu, *firing sequence* yang dibahas hanyalah *firing sequence* untuk menghasilkan kurikulum yang ada, yaitu kurikulum masa studi 4 dan 3,5.

Dalam kasus ini, *reachability* merepresentasikan MK yang mungkin dapat diambil. Dari hasil analisis *firing sequence*, semua *marking* dilalui dalam proses *firing*. Dengan demikian, semua *place* merupakan *reachable marking*.

Dalam kasus ini, *useful transition* merepresentasikan pengambilan MK yang mempengaruhi MK lain, kuota SKS dan total SKS. Himpunan *useful transition* $use_N(T) = \{20SKS, 24SKS, decSKS, takeKalkulusII, takeProbst, takeBhsIngII, takeBhsIngIII, takeTA1, takeTA2, takeAlstrukdat, takeDAA, takeAI, takePBO, takeIMK, takeGrafcit, takeIbistel, takePBDR, takePrakBasdat, takeSBD, takeCOA, takeSisop, takePrakSisop, takeJarkom, takeKapsel, takeTekom, takeKP, takeRPL, takeRPLOOT, takeAPSI, takeMPTI, takePilihanI, takePilihanII, takePilihanIII, takePilihanIV, takePilihanBebasI, takePilihanBebasII\}$. Banyaknya anggota dalam himpunan $use_{N_1}(T)$ adalah 36.

Dalam kasus ini, *useful transition* merepresentasikan pengambilan MK yang mempengaruhi MK lain, kuota SKS dan total SKS. Himpunan *useful transition* $use_N(T) = \{20SKS, 24SKS, decSKS, takeKalkulusII, takeProbst, takeBhsIngII, takeBhsIngIII, takeTA1, takeTA2, takeAlstrukdat, takeDAA, takeAI, takePBO, takeIMK, takeGrafcit, takeIbistel, takePBDR, takePrakBasdat, takeSBD, takeCOA, takeSisop, takePrakSisop, takeJarkom, takeKapsel, takeTekom, takeKP, takeRPL, takeRPLOOT, takeAPSI, takeMPTI, takePilihanI, takePilihanII, takePilihanIII, takePilihanIV, takePilihanBebasI, takePilihanBebasII\}$. Banyaknya anggota dalam himpunan $use_{N_1}(T)$ adalah 36.

Live transition dari p/t-nets N merupakan *transition* yang dapat ditembakkan (*firing*) dari setiap *reachable marking*. Dengan demikian, karena tidak ada *transition* yang dapat ditembakkan dari setiap *reachable marking*, maka p/t-nets N tidak mempunyai *live transition*.

Dalam kasus ini, *causality* merepresentasikan proses yang menyebabkan dapat diambilnya suatu MK. Berikut ini adalah hasil analisis *causality* p/t-nets N Kurikulum. Terdapat 2 *transition* yang bersifat *causality*, seperti ditampilkan pada tabel berikut:

TABEL III
CAUSALITY P/T-NETS N KURIKULUM

No.	Nama Transition	Causality Transition	No.	Nama Transition	Causality Transition
1	20SKS	decSKS takeKalkulusI takeAILin takeMatdis takeFisika takePrakFisika takeManajemen takeProkom takePrakProkom takePrakInternet takePTI takeGeladi takePilihanI takePilihanII takePilihanIII takePilihanIV takePilihanBebasI takePilihanBebasII	2	24SKS	decSKS takeKalkulusI takeAILin takeMatdis takeFisika takePrakFisika takeManajemen takeProkom takePrakProkom takePrakInternet takePTI takeGeladi takePilihanI takePilihanII takePilihanIII takePilihanIV takePilihanBebasI takePilihanBebasII

Dalam kasus ini, *concurrent transition* merepresentasikan proses yang dapat dipilih yaitu pengambilan kuota SKS. Dari p/t-nets N , dapat diketahui bahwa $\{20SKS, 24SKS\} \text{ con } M$ dengan M adalah *reachable marking*. Dengan demikian, ada 2 *concurrent transition*, yaitu 20SKS dan 24SKS.

Dalam kasus ini, *conflict* merepresentasikan kuota SKS yang menyebabkan keterbatasan (konflik) dalam pengambilan MK. Dari p/t-nets N_1 kurikulum dapat dilihat bahwa *place* kuotaSKS meng-*enabled* beberapa *transition*. Dengan demikian, ada 1 *place* yang menimbulkan *conflict*, yaitu *place* kuotaSKS.

Dalam kasus ini, *confusion* merepresentasikan kebebasan (dapat disebut kebingungan) dalam pengambilan MK. Dari analisis *conflict* p/t-nets N , telah diketahui bahwa ada *concurrent transition* yaitu 20SKS dan 24SKS yang menyebabkan *place* kuota SKS menjadi *conflict*. Oleh karena itu, p/t-nets N *confused* di *marking* kuotaSKS.

Dalam kasus ini, *boundedness* merepresentasikan batas maksimal SKS yang dapat diambil. Dari p/t-nets N , dapat dilihat bahwa ada *place* yang jumlah *token*-nya tidak dibatasi, yaitu totalSKS. Dengan demikian, karena ada *place* yang tidak *bounded*, maka p/t-nets N tidak *bounded*.

Deadlock merepresentasikan terhentinya proses pengambilan MK dan tidak dapat mengambil MK. Karena semua *transition* di p/t-nets N dapat di-*enabled* oleh suatu *reachable marking*, maka p/t-nets N tidak mempunyai *dead transition*. Karena p/t-nets N tidak mempunyai *dead transition*, maka p/t-nets N bersifat *deadlock-free*.

Dari p/t-nets N dapat dilihat bahwa *initial marking* $M_{in} = \{\}$ tetapi kondisi tersebut tidak dapat dicapai kembali karena *marking* dalam totalSKS akan berubah seiring dengan proses *firing*. Dengan demikian, p/t-nets N tidak bersifat *reversible*.

V. Simpulan

Jurnal ini telah berhasil memodelkan prasyarat MK dan kurikulum dalam Petri Nets. Kemudian, model prasyarat MK, dan kurikulum sesuai dengan sistem akademik yang ada, tidak *deadlock* dan tidak *reversible*. Model kurikulum dapat menimbulkan *confusion*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] BAN-PT. (2011). Hasil Pencarian Akreditasi Program Studi. [Online]. Tersedia: <http://ban-pt.kemendiknas.go.id/hasil-pencarian.php>. [20 September 2011]
- [2] Reisig Wolfgang dan Grzegorz Rozenberg, 1998, *Lectures on Petri Nets I: Basic Models, Advances in Petri Nets, Jerman*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [3] Marsan, M. Ajmon, 1995, *Modelling with Generalized Stochastic Petri Nets*, Inggis, John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Tim Penyusun. (2008). *Buku Panduan Mahasiswa – IT Telkom 2008/2009*. Bandung: Institut Teknologi Telkom.
- [5] Tim Penyusun. (2010). *Buku Panduan Institusi Tahun Akademik 2010/2011*. Bandung: Institut Teknologi Telkom.