



METODE PENJADWALAN M-PERT SEBAGAI ALTERNATIF SOLUSI AKURASI ESTIMASI WAKTU PROYEK (*REVIEW*)

Reza Ferial Ashadi*, Albert Eddy Husin

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Mercu Buana, Jakarta

*Corresponding author, email address: reza.ferial@mercubuana.ac.id

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<i>Article History:</i> Received 15 February 2024 Accepted 6 March 2025 Online 30 March 2025 <i>Keywords:</i> Estimated accuracy M-PERT PERT Project time estimation Project completion delay	Delay in project completion is the most common problem in the construction industry worldwide. Many things cause this to happen, mainly because of lack of accurate scheduling planning. One of the most common and widely used methods is PERT. However, conventional PERT method ignores the calculation of path duration other than the critical path. This causes a bias in calculating the total project time. This paper intends to introduce the M-PERT scheduling method developed by Pablo Ballesteros-Perez, where this method is a development of conventional PERT method which combines all existing pathways into one combined path. This M-PERT method is enough to use manual calculations without using computer-based simulations or certain software. Several case examples are used to facilitate better understanding of this M-PERT method. The accuracy of the M-PERT method has also improved. This can be seen with a case study example comparing the PERT and M-PERT methods. As a reference value, the Standard Normal Distribution is used. From the results of the M-PERT method calculations for the case study example, the average total duration (mean) of the project $\mu_p = 165.71$ and the standard deviation of the project were obtained $\sigma_p = 10.05$. Meanwhile, using the PERT method, we obtained $\mu_p = 168$ and $\sigma_p = 9.33$. From the calculations using MS-Excel software, it was found that the project duration in the case study example using the conventional PERT method had an error of about 14%, while using the M-PERT method, the error was about 2%. ©2025 Magister Teknik Sipil USK. All rights reserved

1. PENDAHULUAN

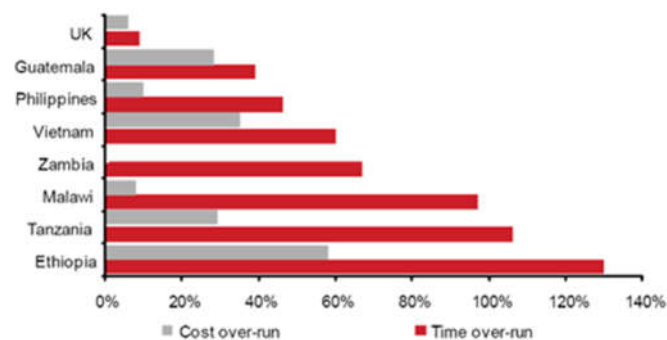
Suatu proyek konstruksi yang dapat diselesaikan tepat waktu merupakan ukuran keberhasilan suatu proyek. Banyak proyek pembangunan di negara-negara berkembang telah mengalami keterlambatan waktu (*time overrun*) dan peningkatan biaya (*cost overrun*), yang terkadang melebihi 100% dari biaya dan durasi proyek yang seharusnya. Keterlambatan waktu (*time overrun*) sangat umum dan terjadi pada hampir semua proyek. Pada Gambar 1, terlihat prosentase keterlambatan (*time overrun*) dan pembengkakan biaya (*cost overrun*) di beberapa negara, bahkan sampai negara maju seperti Inggris pun masih terjadi *overrun*, walaupun jumlahnya dibawah 10% (Matthews, 2016).

Secara umum, teknik dalam penjadwalan proyek dapat dikelompokkan menjadi dua metode, *Gantt Chart* dan *Network Planning*. Metode *Network Planning* adalah salah satu teknik manajemen yang dapat digunakan untuk membantu manajemen dalam perencanaan dan pengendalian proyek. Ada dua teknik dasar yang digunakan dalam perencanaan jaringan (*network planning*), *Critical Path Method (CPM)* dan *Program Evaluation Review and Technique (PERT)*. *CPM* adalah metode penjadwalan yang mengarah ke

perkiraan waktu yang bersifat pasti atau deterministik. Sedangkan *PERT* adalah metode berorientasi waktu yang mengarah pada penentuan jadwal yang bersifat kemungkinan atau probabilistik (Kholil dkk., 2018).

Namun, masalah yang muncul adalah, meskipun *PERT* menjadi metode penjadwalan yang sangat populer, juga mungkin menjadi salah satu metode penjadwalan yang paling banyak disalahpahami (Ballesteros-Pérez, 2017). Banyak orang masih berpikir apakah *PERT* itu adalah suatu jenis representasi jaringan (*type of network representation*), atau *PERT* itu hanyalah suatu teknik estimasi waktu dan/atau biaya dengan menggunakan tiga jenis waktu, waktu optimis, waktu yang paling mungkin, dan waktu pesimis. Kesalahpahaman terakhir adalah bahwa metode *PERT* menghitung durasi proyek yang diharapkan dan variansnya dengan cara menghitung waktu kegiatan proyek pada jalur kritis saja (Ballesteros-Pérez, 2017).

Tujuan dari penulisan artikel ini adalah selain dari mengkaji ulang metode *PERT*, juga memperkenalkan suatu metode definisi ulang yang baru (*a newly redefined technique*) bernama M-*PERT*, yang memperbaharui kesulitan dari metode *PERT* konvensional dalam menghitung bias durasi total proyek, memudahkan perhitungan waktu secara manual, serta menambah beberapa cara-cara baru dimana metode *PERT* konvensional tidak bisa menanggulangnya. Artikel ini merupakan review dari artikel asli yang berjudul “*M-PERT : Manual Project Duration Estimation Technique for Teaching Scheduling Basics*” karangan Pablo Ballesteros-Perez yang diterbitkan oleh ASCE dengan tambahan literatur serta tambahan dari penulis berisi contoh-contoh kasus M-*PERT* beserta perhitungannya untuk mempermudah pemahaman. Metode M-*PERT* ini dikembangkan oleh Pablo Ballesteros-Pérez, Ph.D. Seorang pengajar di School of Construction Management and Engineering, University of Reading, Inggris



Gambar 1. Rata-rata *overruns* dari 145 proyek konstruksi sektor publik dari 8 negara
Sumber: (Matthews, 2016)

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1. Metode *PERT*

Pada tahun 1959, sebuah tim riset operasi yang dibentuk oleh DG Malcom, JH Roseboom, dan CE Clark dari perusahaan Booz Allen Hamilton di Chicago, bersama dengan W. Fazar dari US Navy Special Projects Office di Washington, menerbitkan sebuah teknik untuk mengukur dan mengendalikan kemajuan program armada rudal balistik Polaris (Malcolm dkk., 1959). Teknik ini awalnya bernama *Program Evaluation Research Task* dan kemudian berganti nama menjadi *Program Evaluation and Review Technique (PERT)*. Metode tersebut telah menjadi salah satu alat penjadwalan manajemen proyek yang paling populer sejak saat itu.

PERT adalah metode penjadwalan berbasis jaringan untuk perencanaan dan penjadwalan banyak kegiatan yang saling terkait dalam suatu proyek besar dan kompleks. Saat ini metode *PERT* secara luas digunakan dalam proyek besar seperti pengembangan perangkat lunak, konstruksi bangunan, pekerjaan pemeliharaan, dan lain-lain (Aribisala dkk., 2017). *PERT* adalah suatu metode penjadwalan yang terdiri dari dua tahap (Ballesteros-Pérez, 2017). Tahapan-tahapan tersebut dijelaskan seperti berikut.

Tahap 1: setelah mengidentifikasi seluruh kegiatan atau aktifitas pada suatu proyek dan membuat hubungan keterkaitan (*precedence relationships*) antara masing-masing kegiatan, tahap selanjutnya adalah membuat model kemungkinan durasi masing-masing kegiatan. Untuk keperluan tersebut, PERT konvensional menggunakan prosedur estimasi tiga-jenis waktu (*three-point estimation procedure*). Pembuat jadwal (atau seorang pakar lainnya) diminta untuk membuat estimasi atau prakiraan durasi waktu optimis (O), waktu yang paling mungkin (L), dan waktu pesimis (P) dari masing-masing kegiatan atau aktifitas. Durasi rata-rata (*mean duration*) (μ) dan simpangan baku (*standard deviation*) (σ) dapat dihitung dengan menggunakan tiga-jenis waktu, yaitu (Adegoke, 2011, Habibi dkk., 2018, Ballesteros-Pérez, 2017):

$$\mu = \frac{(O + 4L + P)}{6} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{P - O}{6} \quad (2)$$

Sementara nilai Varians (V) adalah kuadrat dari simpangan baku

$$V = \sigma^2 \quad (3)$$

Dengan nilai μ dan σ untuk masing-masing aktifitas, sebuah distribusi beta dengan nilai yang bervariasi antara [O, P] sangat cocok untuk me-model-kan durasi aktifitas.

Tahap 2 : Tahap ini terdiri dari (1) Meng-identifikasi aktifitas atau kegiatan yang berada pada jalur kritis, dan (2) membuat asumsi bahwa durasi rata-rata proyek (μ_p) dan simpangan baku proyek (σ_p) adalah

$$\mu_p = \sum_{i \in \text{jalur kritis}} \mu_i \quad (4)$$

Akhirnya, jika seorang pembuat jadwal proyek ingin mengetahui kemungkinan atau probabilitas proyek tersebut akan selesai dalam waktu X hari, pembuat jadwal proyek tersebut hanya perlu mengetahui bahwa total durasi proyek tersebut akan mengikuti Distribusi Normal dengan nilai rata-rata (*mean*) μ_p dan simpangan baku (*standard deviation*) σ_p . Probabilitas selesainya proyek dalam waktu X hari bisa dihitung menggunakan formula matematika dari Distribusi Normal Kumulatif dengan mengurutkan menggunakan perangkat lunak untuk spreadsheet, **atau**, bisa juga di hitung secara manual, dengan menggunakan formula (6) dibawah dan kemudian mencari nilai probabilitas kumulatif (*cummulative probability value*) z pada Tabel Normal Standard (*Standard Normal Table*).

$$z = \frac{(X - \mu_p)}{\sigma_p} \quad (6)$$

Kedua tahap inilah inti dari metode penjadwalan PERT. Sejak pertama kali diperkenalkan, metode PERT ini menuai banyak kritikan, salah satunya oleh Angkatan Udara Amerika Serikat (*U.S. Air Force*) karena adanya kesalahan sistematik dan kesalahan yang konsisten (*consistent and systematic errors*) pada perkiraan waktu jadwal proyek-proyek Angkatan Udara Amerika Serikat. Oleh pihak Angkatan Udara A.S. lalu dilakukan penelitian yang di berikan kepada suatu perusahaan swasta yaitu Rand Corporation. MacCrimmon dan Ryavec dari perusahaan tersebut melakukan perincian PERT menjadi lebih detail dan melakukan analisa secara menyeluruh lebih daripada siapapun yang melakukan penelitian tentang PERT sebelumnya. MacCrimmon dan Ryavec menemukan bahwa menggunakan estimasi tiga-jenis waktu (*three-point estimates*) menyebabkan adanya kesalahan sebesar 10% sampai 20% pada range waktu [O, P], walaupun sebenarnya kesalahan estimasi rata-rata (μ) dan simpangan baku (σ) lebih besar yaitu sekitar 15% - 30% (Ballesteros-Pérez, 2017).

Namun, dari analisa model, MacCrimmon dan Ryavec menemukan kesalahan sebenarnya. MacCrimmon dan Ryavec menemukan bahwa seandainya tidak ada satu jalur kritis yang sangat dominan (sebuah rantai aktifitas dimana total durasi proyek secara signifikan jauh lebih panjang dari jalur terjauh kedua), maka perhitungan PERT rata-rata durasi proyek [Pers. (4)] akan jauh lebih kecil, atau terlalu optimis (mengabaikan durasi proyek yang sesungguhnya) sedangkan perhitungan PERT simpangan baku [Pers. (5)] akan berlaku sebaliknya (terlalu tinggi memperhitungkan varians durasi yang sesungguhnya).

Sehingga semakin banyak jalur yang paralel, maka akan semakin besar pula kesalahan perhitungan durasi total proyek.

Dalam penelitian yang lain, Herrerias-Velasco dkk. (2011) melakukan analisis tentang perhitungan rata-rata (*mean*) (Persamaan 1) dan simpangan baku (*standard deviation*) (Persamaan 2). Jose Manuel Herrerias-Velasco menemukan bahwa untuk perhitungan rata-rata (*mean*) cukup akurat sementara terdapat koreksi untuk perhitungan simpangan baku (*standard deviation*). Dimana formula simpangan baku yang baru menurut Herrerias-Velasco dkk. (2011) adalah sebagai berikut.

$$\sigma = \sqrt{C(\delta) \times \frac{(P - O)^2}{36}} \quad (7)$$

$$C(\delta) = \frac{5}{7} + \frac{16}{7} \times \delta(1 - \delta) \in \left[\frac{5}{7}, \frac{9}{7}\right] \quad (8)$$

$$\delta = \frac{L - O}{P - O}, \delta \in [0,1] \quad (9)$$

2.2. Metode M-PERT

Metode M-PERT adalah pengembangan dari metode PERT konvensional. Metode M-PERT ini dikembangkan oleh Pablo Ballesteros-Pérez, Ph.D. Seorang pengajar di School of Construction Management and Engineering, University of Reading, Inggris. M-PERT ini dikembangkan berdasarkan pada lima penelitian terdahulu yaitu penelitian oleh Pritsker (1996), Sculli dan Schum (1991), Gong dan Hugsted (1993), Cox (1995), dan Mehrotra et. Al. (1996) yang sebagian besar berbagi beberapa ciri tertentu (Ballesteros-Pérez, 2017). Pokok pemikiran dari kelima penelitian tersebut, yang diambil sebagai bahan kajian untuk pengembangan M-PERT, adalah (Ballesteros-Pérez, 2017):

1. Menghindari keharusan untuk menghitung semua jalur yang mungkin (kritis dan tidak kritis) (memungkinkan jaringan besar)
2. Memperbolehkan adanya aplikasi rekursif dari aktifitas maksima dan/atau minima (penyederhanaan hemat-waktu)
3. Distribusi normal untuk pemodelan durasi kegiatan (hanya mean dan varians saja)
4. Memperbolehkan korelasi antara aktifitas yang berbeda (bisa untuk proyek yang rumit)
5. Menggunakan formula sederhana untuk memecahkan penggabungan aktifitas (kesederhanaan perhitungan)
6. Memperbolehkan adanya tambahan modul (kegiatan minima, *self-loops*, *probabilistic paths*, dll) (kemiripan pada realitas yang ada).

Kelima metode ini memanfaatkan jaringan *activity-on-arc* (AoA), sedangkan M-PERT menggunakan *activity-on-node* (AoN) karena lebih mudah digunakan oleh para praktisi dan lebih umum ditemukan dalam perangkat lunak (misalnya, Microsoft Project, Oracle Primavera). Akibatnya, hubungan pendahuluan (*Precedence Relationships*) perlu digambarkan oleh panah yang menghubungkan simpul (*node*). Sudah diketahui dengan baik bahwa, dengan diberikan dua kegiatan i dan j, akan ada empat hubungan yang didahulukan: selesai i — mulai j (yang paling umum sejauh ini), mulai i — mulai j, selesai i — selesai j, dan mulai i — selesai j. Semua kegiatan ini bisa dengan atau tanpa jeda waktu di antara kegiatan i dan j.

Pada dasarnya, M-PERT adalah teknik reduksi di mana kegiatan proyek digabung oleh grup yang terdiri dari dua atau lebih kegiatan, yang pada akhirnya menghasilkan satu kegiatan gabungan baru. Proses ini diulang sampai hanya ada satu kegiatan yang tersisa, yang mewakili durasi proyek total. Prosedur penggabungan (Ballesteros-Pérez, 2017) adalah pendekatan intuitif dan relatif cepat untuk mengurangi jaringan atau jalur yang banyak dan rumit menjadi lebih sederhana. Tentu saja, tantangannya adalah bagaimana menggabungkan kegiatan yang berbeda (yang pada akhirnya sesuai dengan distribusi durasi).

Untuk tujuan itu, diasumsikan bahwa durasi kegiatan mengikuti distribusi normal. Menyadari bahwa distribusi probabilitas khusus hampir tidak penting, untuk memenuhi kebutuhan menyederhanakan

sebanyak mungkin operasi penggabungan kegiatan dalam jalur seri, yang paling sering ditemukan di jaringan (*network*) apa pun.

Dalam operasi penggabungan ini, jalur-jalur yang paling sering dijumpai adalah penggabungan jalur-jalur seri dan penggabungan maksima pada jalur paralel. Jalur-jalur ini pada umumnya adalah jalur-jalur yang paling sering dijumpai dalam pekerjaan suatu proyek. Khususnya dalam proyek konstruksi, jalur-jalur seperti jalur probabilistik (alternatif) tampaknya cukup mudah untuk me-model-kan aktifitas yang tidak pasti yang hampir sepenuhnya bergantung pada informasi yang masih belum diketahui, atau setidaknya tidak akurat, pada tahap konseptual. Contohnya seperti dalam pemilihan jenis-jenis fondasi. Pemilihan tersebut tergantung pada kondisi tanah atau daya dukung tanah, atau hanya perlu untuk mengambil tindakan khusus jika proyek tersebut membuka situs arkeologi.

Self-loops, menggambarkan aktifitas-aktifitas yang berulang setelah hasil yang gagal. Aktifitas-aktifitas ini berhubungan dengan aktifitas tertutup (seperti uji beban, kalibrasi) atau bahkan kumpulan aktifitas (contohnya proses penggambaran proyek, sekumpulan elemen struktur yang cacat). Tergantung pada si pembuat jadwal untuk menentukan berapa banyak *loop* yang berlaku sebelum seorang manajer konstruksi atau klien menghentikan proses perulangan.

Pada kegiatan minima, meskipun kegiatan ini jarang terjadi dibanding kegiatan maksima, berguna untuk melanjutkan proyek setelah satu (atau sebagian) kegiatan pendahulu (*predecessors*) telah selesai. Patut dicatat bahwa M-PERT mensyaratkan bahwa durasi rata-rata (μ_i) dan simpangan baku (σ_i) ditentukan untuk setiap kegiatan sebelumnya. Persyaratan ini mengharuskan adanya nilai durasi rata-rata (μ_i) dan simpangan baku (σ_i). Jika memulainya dari estimasi tiga-jenis waktu (*three-point estimates*), yaitu waktu optimis (O), waktu *most-likely* (L), dan waktu pesimis (P) maka formula (1) dan formula (2), dengan koreksi formula (7), (8), dan (9), harus diterapkan pada setiap aktifitas, seperti yang berlaku pada PERT konvensional.

Untuk jalur probabilistik, p menggambarkan bobot dari jalur tersebut, dimana jumlah keseluruhan bobot pada jalur probabilistik tersebut adalah satu. Secara keseluruhan M-PERT menggabungkan seluruh kegiatan yang ada sampai ada satu kegiatan tersisa yang memodelkan total durasi proyek dengan menggunakan μ_p dan σ_p , yang masing-masing sesuai dengan rata-rata durasi proyek dan simpangan baku nya.

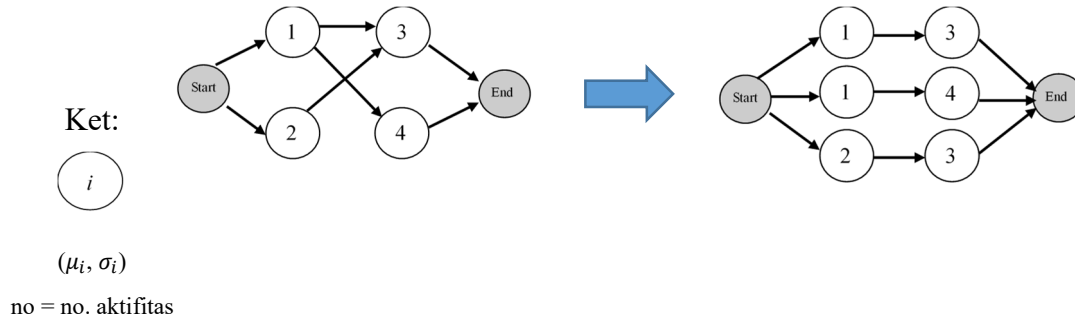
Urutan penggabungan juga penting. Sebagai contoh, jika *self-loop* terdiri dari beberapa aktifitas, aktifitas-aktifitas dalam *self-loop* tersebut yang pertama-tama harus digabungkan dan kemudian *self-loop* diselesaikan atau jika ada beberapa aktifitas secara seri dalam jalur paralel, aktifitas seri tersebut harus digabungkan terlebih dahulu sebelum jalur tersebut dapat digabungkan dengan jalur lain. Secara keseluruhan, logika tetap menjadi faktor utama ketika melakukan penggabungan, kecuali jika ada korelasi di antara kegiatan (akan ada penjelasan lebih lanjut), prosedur penggabungan relatif cukup mudah.

Seandainya terdapat jalur yang saling terkait, maka perhitungan maksima dan minima akan mempunyai nilai ρ . Prosedur perhitungannya adalah dengan memperhitungkan nilai varian dan covarian antara jalur-jalur yang saling terkait tersebut. Prosedur ini pada dasarnya membutuhkan identifikasi semua kemungkinan jalur dan menggabungkannya – pertama, kedua jalur lalu satu demi satu – dengan kelompok yang sudah digabungkan. Cara perhitungan nilai ρ dapat dilihat pada persamaan dibawah ini. Asumsi terdapat empat jalur paralel (A, B, C, dan D) (Ballesteros-Pérez, 2017). Penjelasan tertera pada Gambar 2.

$$\rho_{AB} = \frac{COV_{AB}}{\sigma_A \sigma_B} \quad (10)$$

$$\rho_{ABC} = \frac{COV_{AC}\phi(\delta_{AB}) + COV_{BC}[1 - \phi(\delta_{AB})]}{\sigma_{AB}\sigma_C} \quad (11)$$

$$\rho_{ABCD} = \frac{\{COV_{AD}\phi(\delta_{AB}) + COV_{BD}[1 - \phi(\delta_{AB})]\}\phi(\delta_{ABC})}{\sigma_{ABC}\sigma_D} + \frac{COV_{CD}[1 - \phi(\delta_{ABC})]}{\sigma_{ABC}\sigma_D} \quad (12)$$



Gambar 2. Contoh jaringan AoN dengan korelasinya
 Sumber: Ballesteros-Pérez (2017)

Keterangan Gambar 2:

Jalur A (kegiatan 1-3)	Jalur B (kegiatan 1-4)	Jalur C (kegiatan 2-3)
$\mu_A = \mu_1 + \mu_3$	$\mu_B = \mu_1 + \mu_4$	$\mu_C = \mu_2 + \mu_3$
$\sigma_A^2 = \sigma_1^2 + \sigma_3^2$	$\sigma_B^2 = \sigma_1^2 + \sigma_4^2$	$\sigma_C^2 = \sigma_2^2 + \sigma_3^2$
$COV_{AB} = COV_{BA} = \sigma_1^2$	$COV_{BA} = COV_{AB} = \sigma_1^2$	$COV_{CA} = COV_{AC} = \sigma_3^2$
$COV_{AC} = COV_{CA} = \sigma_3^2$	$COV_{BC} = COV_{CB} = 0$	$COV_{CB} = COV_{BC} = 0$

Untuk menentukan nilai covarian dilihat kegiatan mana yang sama dalam kedua kegiatan tersebut. Dibawah ini adalah beberapa cara dan prosedur yang digunakan untuk menghitung durasi rata-rata (*mean duration*) gabungan μ_k serta durasi simpangan baku (*standard deviation*) σ_k gabungan (Ballesteros-Pérez, 2017).

2.3. Aktifitas-Aktifitas Serial (*Serial Activities*)



Gambar 3. Penggabungan aktifitas-aktifitas Serial

Masukan (*Input*), seperti ditunjukkan Gambar 3:

$$\begin{aligned} &\mu_i, \sigma_i^2 \\ &\mu_j, \sigma_j^2 \\ &\dots \dots \\ &\mu_n, \sigma_n^2 \end{aligned}$$

Prosedur penggabungan:

$$\mu_k = \sum_{x=i,j,\dots,n} \mu_x \quad (13)$$

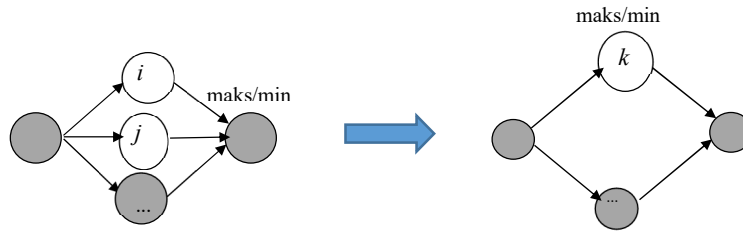
$$\sigma_k^2 = \sum_{x=i,j,\dots,n} \sigma_x^2 \quad (14)$$

Catatan: Prosedur penggabungan serial ini adalah prosedur penggabungan yang paling lazim ditemukan pada dunia nyata, di proyek.

Jika ada jeda waktu t antara dua aktifitas maka,

$$\mu_k = \mu_i + \mu_j + t \quad (15)$$

2.4. Aktifitas pada jalur-jalur Paralel (*Parallel Paths*) Maksimum atau minimum



Gambar 4. Penggabungan aktifitas-aktifitas Paralel

Masukan, seperti ditunjukkan Gambar 4:

$$\mu_i, \sigma_i^2$$

$$\mu_j, \sigma_j^2$$

ρ (jika i dan j saling berhubungan, jika tidak maka $\rho = 0$)

Prosedur penggabungan :

Maksimum

$$\mu_k = \mu_i \Phi(\delta) + \mu_j (1 - \Phi(\delta)) + \theta \varphi(\delta) \quad (16)$$

$$\sigma_k^2 = (\sigma_i^2 + \mu_i^2) \Phi(\delta) + (\sigma_j^2 + \mu_j^2) (1 - \Phi(\delta)) + (\mu_i + \mu_j) \theta \varphi(\delta) - \mu_k^2 \quad (17)$$

Minimum

$$\mu_k = \mu_i (1 - \Phi(\delta)) + \mu_j \Phi(\delta) - \theta \varphi(\delta) \quad (18)$$

$$\sigma_k^2 = (\sigma_i^2 + \mu_i^2) (1 - \Phi(\delta)) + (\sigma_j^2 + \mu_j^2) \Phi(\delta) - (\mu_i + \mu_j) \theta \varphi(\delta) - \mu_k^2 \quad (19)$$

Dimana:

$$\delta = \frac{(\mu_i - \mu_j)}{\theta} \quad (20)$$

$$\theta = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2 - 2\rho\sigma_i\sigma_j} \quad (21)$$

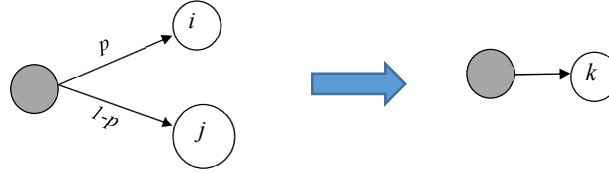
Dan $\varphi(\cdot)$ dan $\Phi(\cdot)$ adalah *Probability Density Function* (PDF) dan *Cummulative Distribution Function* (CDF) dari Distribusi Normal Standard.

Sebagai catatan dari penggabungan aktifitas-aktifitas diatas dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Penggabungan aktifitas paralel ini juga cukup banyak ditemukan dalam dunia proyek (bersama dengan penggabungan serial). Untuk penentuan nilai ρ , seandainya terdapat korelasi antar aktifitas, maka digunakan persamaan (10), (11), dan (12). Seandainya tidak terdapat korelasi maka nilai $\rho = 0$.
2. Untuk penggabungan paralel maksimum maka seluruh aktifitas harus selesai terlebih dahulu sebelum dilanjutkan. Untuk penggabungan paralel minimum cukup hanya satu aktifitas selesai untuk bisa melanjutkan.
3. Jika ada beberapa aktifitas pada, setidaknya satu jalur, gabungkan beberapa aktifitas tersebut terlebih dahulu, setelah itu baru dilakukan penggabungan maksimum/minimum. Jika terdapat lebih dari dua jalur alternatif, selalu lakukan penggabungan jalur yang terdiri dari dua kegiatan

terlebih dahulu, sampai akhirnya selesai dengan hanya satu jalur (aktifitas k pada akhirnya akan menjadi jalur seri)

2.5. Aktivitas-aktivitas pada jalur-jalur Alternatif (*Probabilistic/Alternative Paths*)



Gambar 5. Penggabungan aktivitas-aktivitas Alternatif dua jalur

Masukan, seperti ditunjukkan Gambar 5:

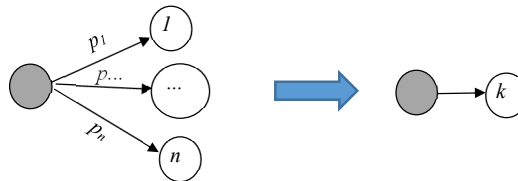
$$\mu_i, \sigma_i^2, p$$

$$\mu_j, \sigma_j^2, q = 1 - p$$

Prosedur penggabungan:

$$\mu_k = p\mu_i + (1 - p)\mu_j \quad (22)$$

$$\sigma_k^2 = p\sigma_i^2 + (1 - p)\sigma_j^2 + p(1 - p)(\mu_i - \mu_j)^2 \quad (23)$$



Gambar 6. Penggabungan aktivitas-aktivitas Alternatif lebih dari dua jalur

Masukan, seperti ditunjukkan Gambar 6:

$$\mu_x, \sigma_x^2, p_x$$

dengan $x = 1, 2, 3, \dots, n$

dimana $\sum_{x=1}^n p_x = 1$

Prosedur penggabungan:

$$\mu_k = \sum_{x=1}^n p_x \mu_x \quad (24)$$

$$\sigma_k^2 = \sum_{x=1}^n p_x (\sigma_x^2 + \mu_x^2) - \mu_k^2 \quad (25)$$

Sebagai catatan dari aktivitas-aktivitas penggabungan tersebut: jika ada banyak aktivitas setelah aktivitas pertama dari jalur tersebut, selesaikan penggabungan tersebut dulu baru dilanjutkan untuk menjadi aktivitas tunggal k . p pada jalur alternatif ini merupakan bobot dari kegiatan, dimana total bobot setiap kegiatan dari jalur alternatif ini adalah satu.

2.6. Self-loops



Gambar 7. Penggabungan aktifitas *Self-loops*

Masukan, seperti ditunjukkan Gambar 7:

$$\mu_i, \sigma_i^2, p_i$$

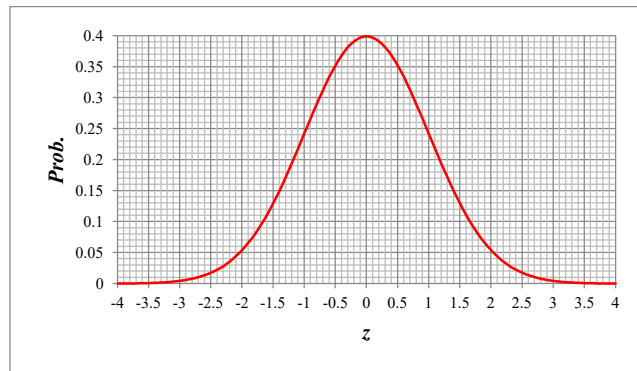
Prosedur penggabungan:

$$\mu_k = (1 + p_i)\mu_i \quad (26)$$

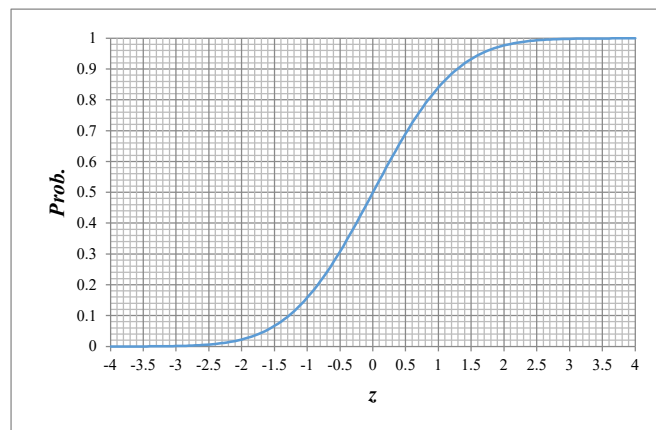
$$\sigma_k^2 = (1 + p_i)\sigma_i^2 + p_i(1 - p_i)\mu_i^2 \quad (27)$$

Sebagai catatan dari aktifitas-aktifitas penggabungan tersebut: jika *self-loop* terdiri dari lebih dari satu aktifitas, gabungkan aktifitas dalam *loop* itu sendiri dulu. Jika terdapat *multiple self-loops*, selesaikan *self-loops* dalam (*inner self-loops*) terlebih dahulu. Untuk menghitung $\varphi(\cdot)$ dan $\Phi(\cdot)$ pada jalur-jalur paralel (*parallel paths*) maksima minima, diperlukan suatu alat (*tools*) bantu.

Alat bantu tersebut adalah grafik $\varphi(\cdot)$ dan $\Phi(\cdot)$ yaitu *Probability Density Function* (PDF) (Gambar 8) dan *Cummulative Distribution Function* (CDF) (Gambar 9) dari Distribusi Normal Standard.



Gambar 8. Grafik *Probability Density Function* ($\varphi(z)$) dari *Standard Normal Distribution*



Gambar 9. Grafik *Cummulative Distribution Function* ($\Phi(z)$) dari *Standard Normal Distribution*

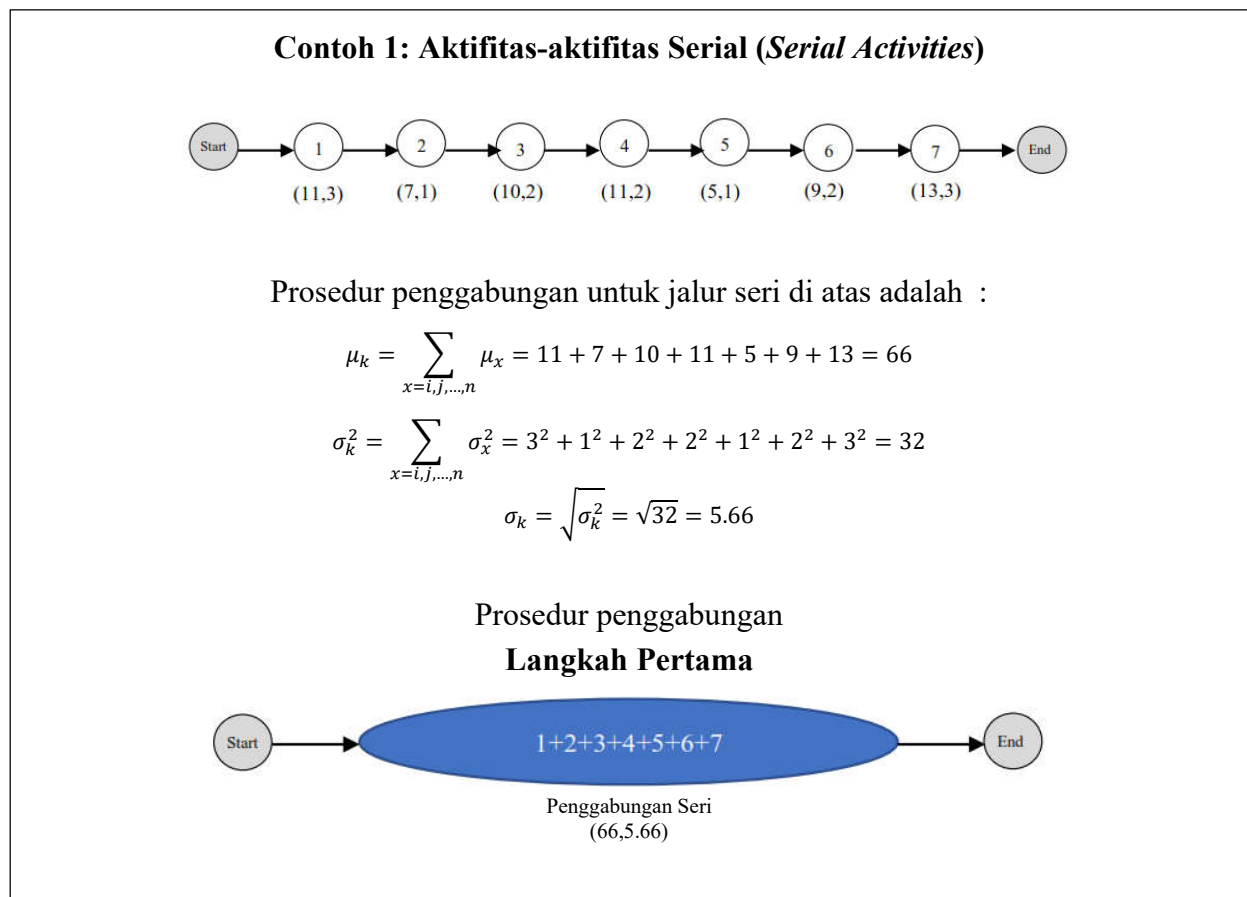
Nilai *Probability Density Function* ($\varphi(z)$) dan *Cummulative Distribution Function* ($\Phi(z)$) dapat juga dicari dengan menggunakan perangkat lunak MS-Excel.

3. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah studi literatur dari berbagai macam literatur, baik dalam negeri maupun luar negeri. Literatur-literatur yang digunakan kebanyakan mempunyai topik tentang penjadwalan (*scheduling*) proyek konstruksi. Penelitian ini merupakan review terhadap artikel yang dituliskan oleh Pablo Ballesteros-Pérez yang berjudul *M-PERT: Manual Project-Duration Estimation Technique for Teaching Scheduling Basics* dengan sejumlah artikel tambahan terutama tentang metode-metode penjadwalan PERT dari dalam negeri dan luar negeri. Pada pembahasan, penulis menggunakan contoh perhitungan dari berbagai macam metode yang dikembangkan dalam M-PERT dengan melakukan perbandingan akurasi menggunakan distribusi normal, PERT dan M-PERT.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode penjadwalan M-PERT dapat digunakan baik untuk jaringan yang rumit maupun jaringan yang sederhana. Perbedaannya hanyalah pada jumlah penggabungan yang diperlukan untuk mereduksi menjadi satu jalur kegiatan yang menggambarkan durasi proyek tersebut. Berikut ini beberapa contoh kasus sederhana dan perhitungan nya.

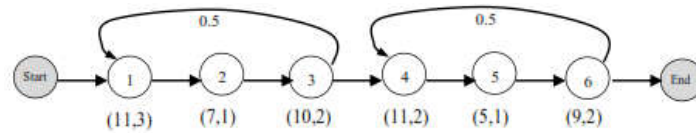


Dari Contoh 1 terlihat bahwa aktifitas-aktifitas 1 sampai 7 digabungkan dan durasi dari masing-masing aktifitas tersebut dijumlahkan menjadi satu aktifitas. Begitu juga dengan perhitungan simpangan baku gabungan aktifitas-aktifitas tersebut. Masing-masing kuadrat dari simpangan baku aktifitas-aktifitas tersebut dijumlahkan, dan hasil penjumlahan tersebut lalu di akar kuadrat kan sehingga menghasilkan nilai simpangan baku gabungan. Nilai dari durasi penggabungan adalah 66 hari dan nilai simpangan baku gabungan adalah 5.66 hari.

Pada Contoh 2 terlihat ada aktifitas serial dan *self-loops*. Aktifitas 1-2-3 dan 4-5-6 dilakukan prosedur penggabungan serial seperti pada contoh-1 sehingga menghasilkan durasi dan simpangan baku untuk

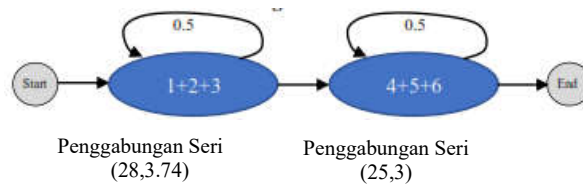
penggabungan aktifitas 1-2-3 dan durasi serta simpangan baku untuk penggabungan aktifitas 4-5-6 seperti terlihat pada langkah-1. Setelah proses penggabungan serial selesai maka dilanjutkan dengan langkah-2 yaitu proses penggabungan *self-loops* untuk masing-masing gabungan serial. Prosedur penggabungan *self-loops* ini menggunakan persamaan (26) dan (27) diatas. Langkah ke-3 adalah menggabungkan kedua aktifitas *self-loops* ini menjadi satu aktifitas menggunakan prosedur serial.

Contoh 2 : Serial dan Self-Loops



Prosedur Penggabungan

Langkah Pertama



Langkah Kedua

Prosedur penggabungan untuk jalur *self-loops* di atas adalah :

$$\mu_k = (1 + p_i)\mu_i = (1 + 0.5) \times 28 = 42 \quad \dots \text{ untuk jalur self - loops } (1 + 2 + 3)$$

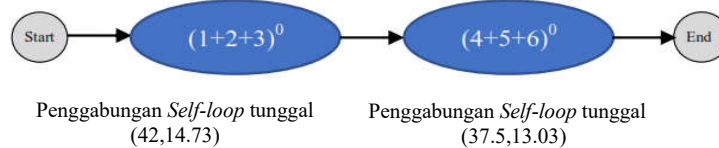
$$\sigma_k^2 = (1 + p_i)\sigma_i^2 + p(1 - p)\mu_i^2 = (1 + 0.5) \times 3.74^2 + 0.5 \times (1 - 0.5) \times 28^2 = 216.98$$

$$\sigma_k = \sqrt{216.98} = 14.73$$

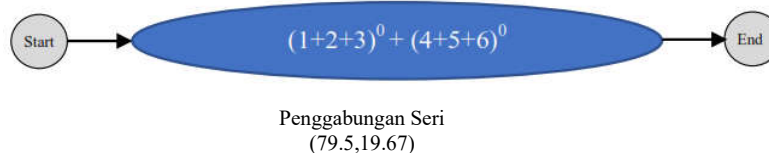
$$\mu_k = (1 + p_i)\mu_i = (1 + 0.5) \times 25 = 37.5 \quad \dots \text{ untuk jalur self - loops } (4 + 5 + 6)$$

$$\sigma_k^2 = (1 + p_i)\sigma_i^2 + p(1 - p)\mu_i^2 = (1 + 0.5) \times 3^2 + 0.5 \times (1 - 0.5) \times 25^2 = 169.75$$

$$\sigma_k = \sqrt{169.75} = 13.03$$

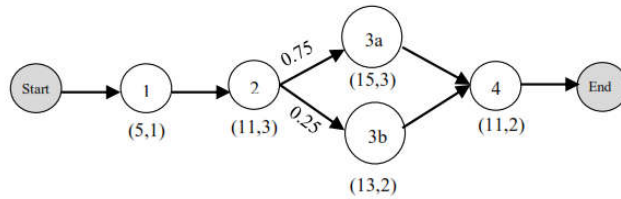


Langkah Ketiga

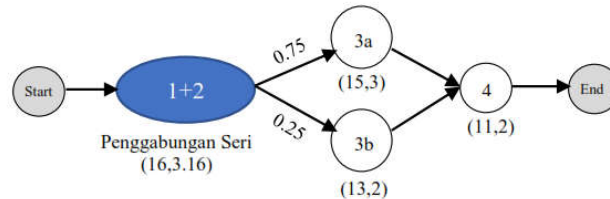


Selanjutnya di Contoh 3 dilakukan penggabungan serial dan probabilistik. Aktifitas 1 dan 2 digabung dengan prosedur serial. Lalu aktifitas 3a dan 3b digabung menggunakan prosedur probabilistik dengan persamaan (22) dan (23). Langkah terakhir dari Contoh 3 adalah menggabungkan ketiga hasil tersebut menjadi satu nilai durasi dan satu nilai simpangan baku.

Contoh 3 : Serial dan Probabilitas (Jalur Alternatif)



Langkah Pertama



Langkah Kedua

Prosedur penggabungan untuk probabilitas (jalur alternatif) di atas adalah :

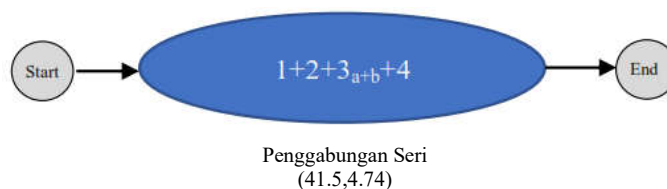
$$\mu_k = p\mu_i + (1-p)\mu_j = (0.75 \times 15) + (0.25 \times 13) = 14.5$$

$$\sigma_k^2 = p\sigma_i^2 + (1-p)\sigma_j^2 + p(1-p)(\mu_i - \mu_j)^2 = 0.75 \times 3^2 + 0.25 \times 2^2 + 0.75 \times 0.25 \times (15 - 13)^2 = 8.5$$

$$\sigma_k = \sqrt{\sigma_k^2} = \sqrt{8.5} = 2.92$$



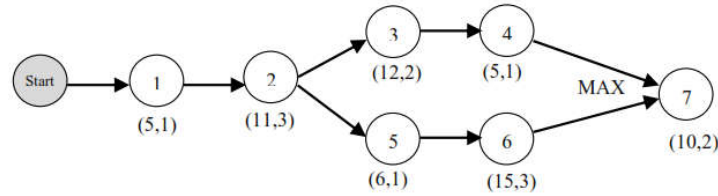
Langkah ketiga



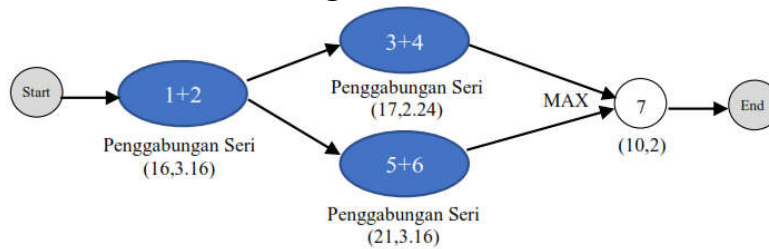
Serial dan paralel (tanpa korelasi antar aktifitas) adalah prosedur penggabungan pada contoh-4. Untuk aktifitas 1-2, 3-4, dan 5-6 dilakukan penggabungan dengan prosedur serial seperti di contoh-1. Hasil dari penggabungan serial aktifitas 3-4 dan aktifitas 5-6 dilakukan lagi penggabungan secara paralel tanpa korelasi antar aktifitas menggunakan persamaan (16) dan (17). Untuk nilai $\varphi(\cdot)$ dan $\Phi(\cdot)$ adalah

Probability Density Function (PDF) dan Cumulative Distribution Function (CDF) dari Distribusi Normal Standard yang bisa dilihat pada Gambar 8 dan 9.

Contoh 4: Serial dan Paralel (Tanpa Korelasi Antar Aktivitas)



Langkah Pertama



Langkah Kedua

Prosedur penggabungan untuk Jalur Paralel (tanpa korelasi) di atas adalah :

$$\theta = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2 - 2\rho\sigma_i\sigma_j} = \sqrt{2.24^2 + 3.16^2} = 3.87$$

Catatan : $\rho = 0$ karena Jalur Paralel tanpa korelasi

$$\delta = \frac{(\mu_i - \mu_j)}{\theta} = \frac{(17 - 21)}{3.87} = -1.03$$

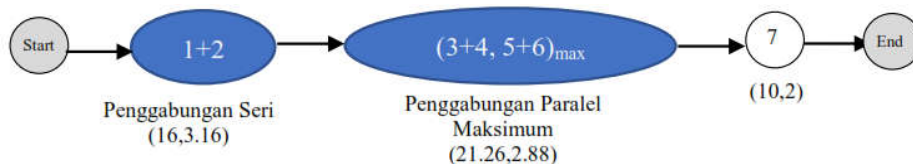
$$\mu_k = \mu_i\phi(\delta) + \mu_j(1 - \phi(\delta)) + \theta\varphi(\delta) = 17 \times \phi(-1.03) + 21 \times (1 - \phi(-1.03)) + 3.87 \times \varphi(-1.03)$$

Catatan : Dari grafik PDF $\varphi(z)$ dan grafik CDF $\Phi(z)$ pada Gambar 8 dan 9, maka didapat nilai $\phi(-1.03) = 0.10$ dan nilai $\varphi(-1.03) = 0.17$

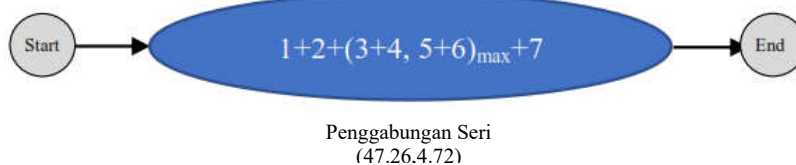
$$\mu_k = \mu_i\phi(\delta) + \mu_j(1 - \phi(\delta)) + \theta\varphi(\delta) = 17 \times 0.10 + 21 \times (1 - 0.10) + 3.87 \times 0.17 = 21.26$$

$$\begin{aligned} \sigma_k^2 &= (\sigma_i^2 + \mu_i^2)\phi(\delta) + (\sigma_j^2 + \mu_j^2)(1 - \phi(\delta)) + (\mu_i + \mu_j)\theta\varphi(\delta) - \mu_k^2 \\ &= (2.24^2 + 17^2) \times 0.10 + (3.16^2 + 21^2) \times (1 - 0.10) + (17 + 21) \times 3.87 \times 0.17 - 21.26^2 = 8.30 \end{aligned}$$

$$\sigma_k = \sqrt{8.30} = 2.88$$

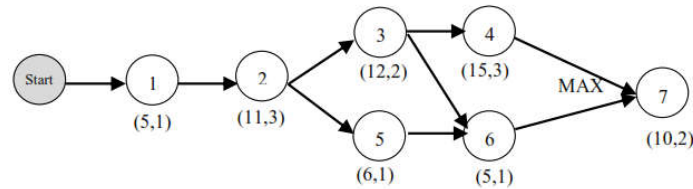


Langkah Ketiga

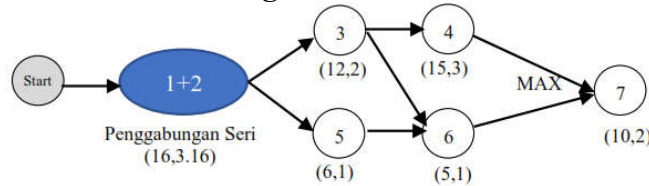


Untuk Contoh 5 yaitu penggabungan Serial dan paralel (dengan korelasi antar aktifitas), dilakukan sama dengan Contoh 4. Bedanya adalah terdapat korelasi pada aktifitas 3. Sehingga terdapat penggabungan serial untuk aktifitas 3-4, 3-5, dan 5-6. Untuk perhitungan durasi dan simpangan baku dimana terdapat korelasi antar kegiatan, bisa dilakukan menggunakan persamaan (10), (11), dan (12).

Contoh 5 : Serial dan Paralel (Korelasi Antar Aktifitas)

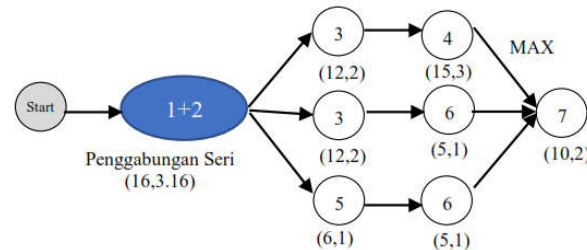
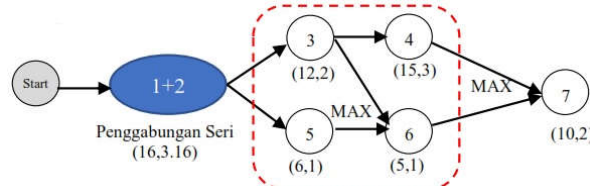


Langkah Pertama



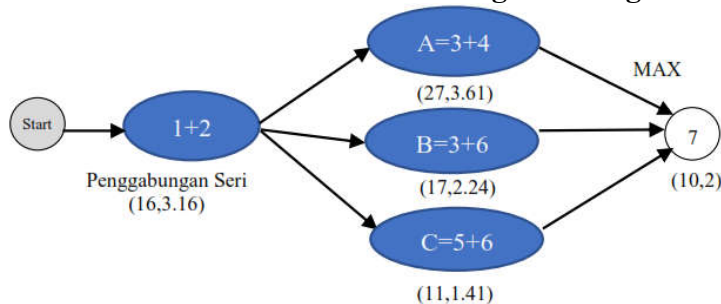
Langkah Kedua

Langkah kedua fokus pada jalur paralel (3,4,5, 6)



Pada langkah kedua ini diidentifikasi semua jalur yang mungkin

Langkah Ketiga



Dari penggabungan seri disamping terlihat bahwa pada jalur A dan B mempunyai korelasi di aktifitas 3 sementara pada jalur B dan C mempunyai korelasi pada aktifitas 6.

Jalur (<i>i</i>)	Aktifitas	μ_i	A	B	C
A	3,4	$12+15=27$	$2^2+3^2=13$	$2^2=4$	0
B	3,6	$12+5=17$	$2^2=4$	$1^2+2^2=5$	$1^2=1$
C	5,6	$6+5=11$	0	$1^2=1$	$1^2+1^2=2$

Contoh 5 : Serial dan Paralel (Korelasi Antar Aktifitas) (Lanjutan)

Pada tabel di atas terlihat bahwa nilai pada diagonal adalah varian, sementara diluar itu adalah covarian.

Langkah Keempat

Sesuai aturan umum yang berlaku, jalur diurut dari yang jalur terlama sampai yang tersingkat, maka proses penggabungan dimulai dari jalur yang mempunyai durasi rata-rata terlama berlanjut sampai yang akhirnya yang paling singkat. Aturan penggabungan satu-per-satu ini, berbeda dengan cara penggabungan jalur aktifitas tanpa korelasi, dimana jika aktifitas tanpa korelasi maka penggabungan bisa dilakukan bebas sepasang demi sepasang. Hal ini karena tuntutan dari persamaan matematika ρ . Dari contoh kasus di atas maka proses penggabungan paralel dimulai dari aktifitas 3+4 (diberi notasi A) yang mempunyai durasi mean 27 dengan aktifitas 3+6 (diberi notasi B) yang mempunyai durasi 17.

$$\rho_{AB} = \frac{COV_{AB}}{\sigma_A \sigma_B} = \frac{4}{3.61 \times 2.24} = 0.49$$

$$\theta_{AB} = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2 - 2\rho\sigma_i\sigma_j} = \sqrt{3.61^2 + 2.24^2 - 2 \times 0.49 \times 3.61 \times 2.24} = 3.18$$

$$\delta_{AB} = \frac{(\mu_i - \mu_j)}{\theta} = \frac{(27 - 17)}{3.18} = 3.14$$

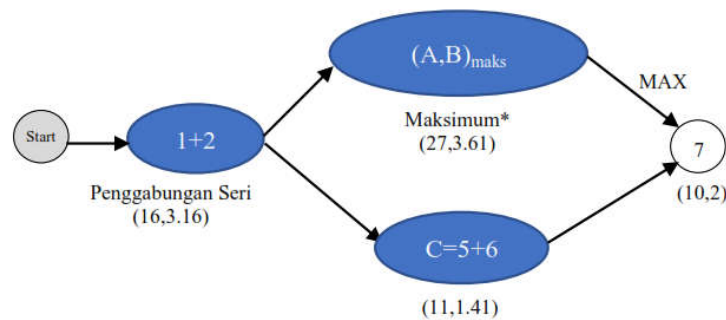
$$\mu_k = \mu_i\phi(\delta) + \mu_j(1 - \phi(\delta)) + \theta\varphi(\delta) = 27 \times \phi(3.14) + 17 \times (1 - \phi(3.14)) + 3.18 \times \varphi(3.14)$$

Catatan : Dari grafik PDF $\varphi(z)$ dan grafik CDF $\phi(z)$ pada Gambar 8 dan 9, maka didapat nilai $\phi(3.14) = 1$ dan nilai $\varphi(3.14) = 0$

$$\mu_k = \mu_i\phi(\delta) + \mu_j(1 - \phi(\delta)) + \theta\varphi(\delta) = 27 \times 1 + 17 \times (1 - 1) + 3.18 \times 0 = 27$$

$$\sigma_k^2 = (\sigma_i^2 + \mu_i^2)\phi(\delta) + (\sigma_j^2 + \mu_j^2)(1 - \phi(\delta)) + (\mu_i + \mu_j)\theta\varphi(\delta) - \mu_k^2 = (3.61^2 + 27^2) \times 1 + (2.24^2 + 17^2) \times (1 - 1) + (27 + 17) \times 3.18 \times 0 - 27^2 = 13.03$$

$$\sigma_k = \sqrt{13.03} = 3.61$$



Langkah Kelima

Penggabungan paralel maksimum (A,B)_{maks} dengan C.

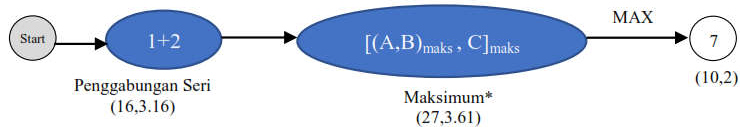
$$\rho_{ABC} = \frac{COV_{AC}\phi(\delta_{AB}) + COV_{BC}[1 - \phi(\delta_{AB})]}{\sigma_{AB}\sigma_C} = \frac{0 \times 1 + 1 \times [1 - 1]}{3.61 \times 1.41} = 0$$

$$\theta_{ABC} = \sqrt{\sigma_{AB}^2 + \sigma_C^2 - 2\rho_{ABC}\sigma_{AB}\sigma_C} = \sqrt{3.61^2 + 1.41^2 - 2 \times 0 \times 3.61 \times 1.41} = 3.88$$

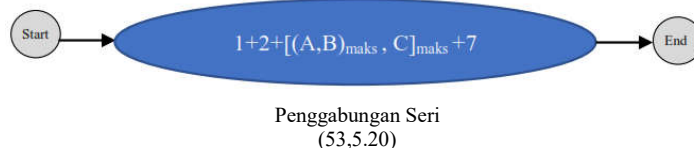
$$\delta_{ABC} = \frac{(\mu_{AB} - \mu_C)}{\theta_{ABC}} = \frac{(27 - 11)}{3.88} = 4.12$$

Lakukan langkah-langkah yang sama dengan prosedur perhitungan dan penggabungan seperti pada

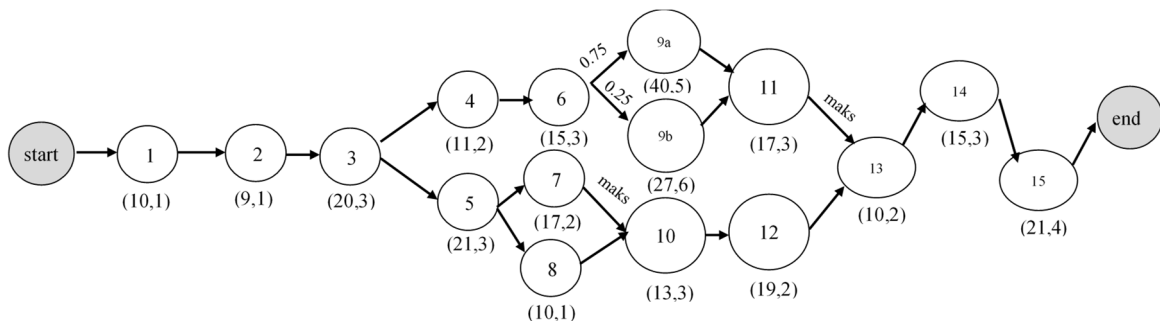
Contoh 5 : Serial dan Paralel (Korelasi Antar Aktivitas) (Lanjutan)



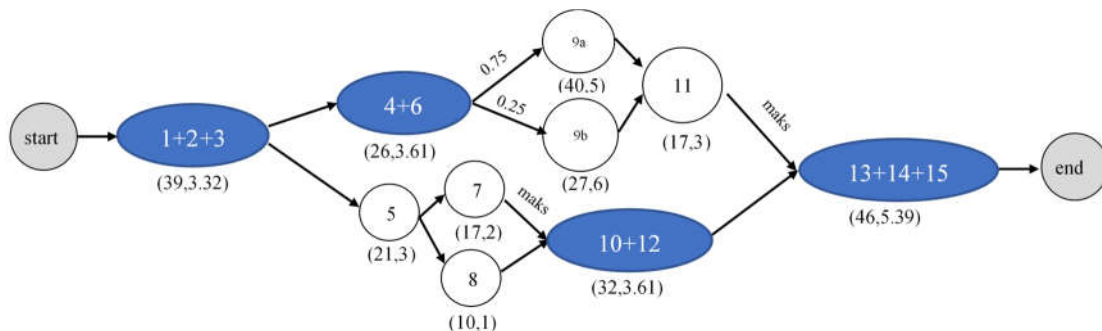
Langkah Keenam



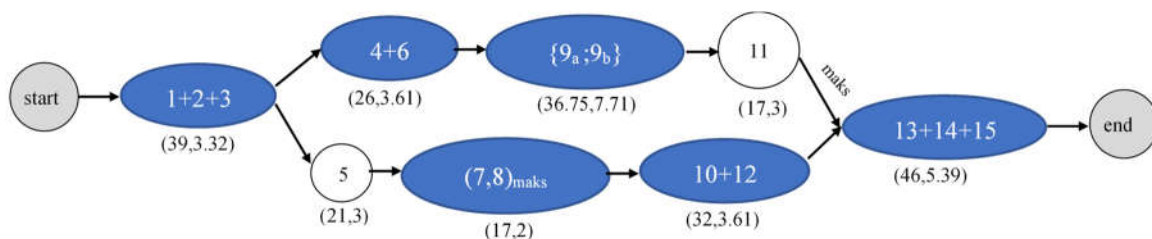
Contoh kasus perbandingan Metode PERT dengan M-PERT



Langkah Pertama (Penggabungan Serial)

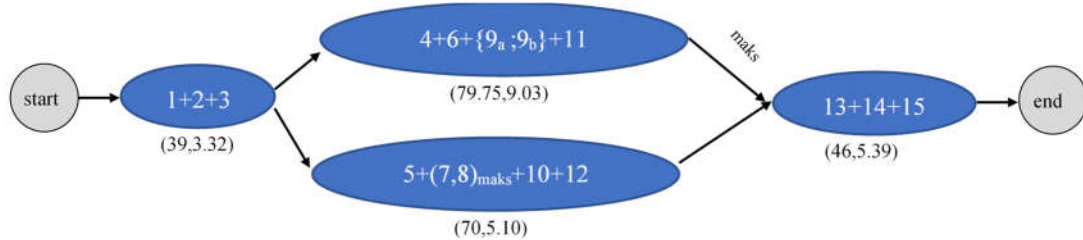


Langkah Kedua (Penggabungan Paralel & Probablistik)

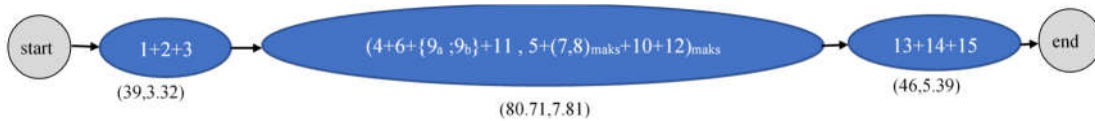


Contoh kasus perbandingan Metode PERT dengan M-PERT (Lanjutan)

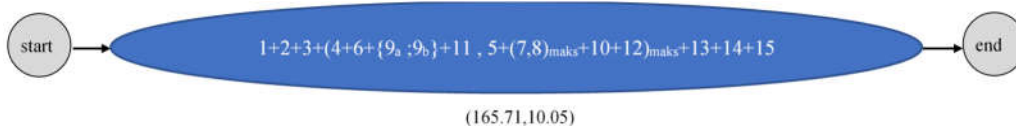
Langkah Ketiga (Pengabungan Serial)



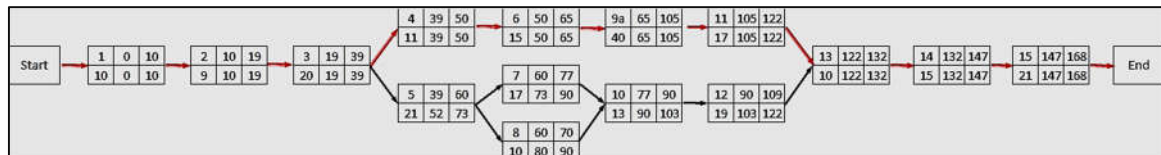
Langkah Keempat (Pengabungan Paralel)



Langkah Kelima (Pengabungan Serial) - Final



PERT



Keterangan:

A	ES	EF
t	LS	LF

Jalur kritis : **1 – 2 – 3 – 4 – 6 – 9a – 11 – 13 – 14 – 15**

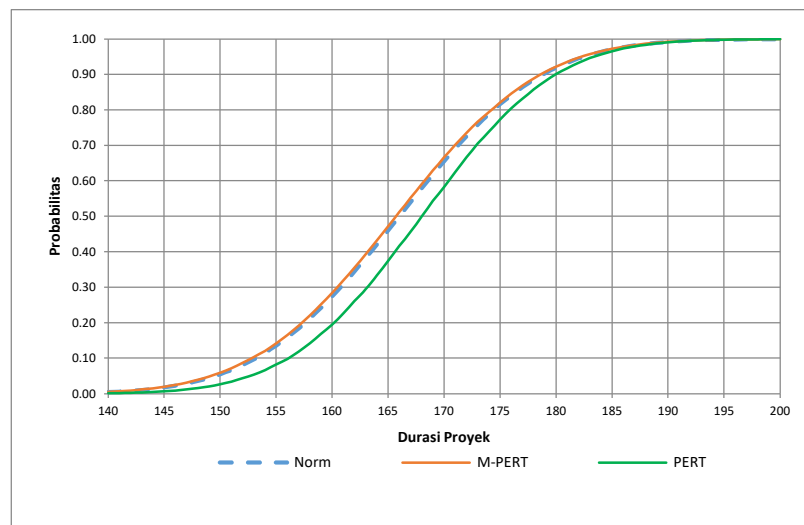
Sebagai catatan, untuk jalur probabilistik (9a dan 9b), dimana metode PERT tidak mengenal aturan ini maka yang diambil adalah jalur yang mempunyai bobot terbesar [3]. Dalam kasus ini yang diambil adalah jalur aktifitas 9a.

Untuk mempermudah pemahaman proses penggabungan antar aktifitas dalam metode M-PERT, terdapat studi kasus seperti diatas. Perbandingan dengan metode penjadwalan PERT juga dilakukan untuk mengetahui akurasi dari masing-masing metode penjadwalan. Terdapat contoh penggabungan serial,

penggabungan paralel, dan penggabungan probabilistik pada studi kasus diatas yang merupakan penggabungan yang paling sering dan paling umum terjadi.

Terdapat 15 aktifitas pada contoh studi kasus diatas dengan durasi dan simpangan baku nya masing-masing. Kelima belas aktifitas tersebut membentuk suatu diagram jaringan (*network diagram*) dengan jalur serial, jalur paralel, dan jalur probabilistik. Dari hasil perhitungan metoda M-PERT untuk contoh kasus di atas didapat nilai durasi total rata-rata (*mean*) proyek $\mu_p = 165.71$ dan simpangan baku proyek $\sigma_p = 10.05$. Sementara dengan menggunakan metode PERT di dapat $\mu_p = 168$ dan $\sigma_p = 9.33$.

Akurasi metode M-PERT ini juga meningkat. Hal ini bisa terlihat dengan contoh kasus perbandingan metode PERT dan M-PERT diatas. Sebagai acuan, digunakan Distribusi Normal Standard. Perbandingan ini ditampilkan dalam suatu grafik, pada Gambar 10.



Gambar 10. Perbandingan akurasi estimasi durasi proyek antara distribusi normal, M-PERT, dan PERT.

Hasilnya adalah, secara visual dari grafik, terlihat bahwa grafik durasi M-PERT dan simulasi grafik durasi distribusi normal terlihat relatif berhimpit. Sementara grafik durasi PERT terlihat jauh.

Dari hasil perhitungan menggunakan perangkat lunak MS-Excel diketahui bahwa durasi proyek pada contoh kasus di atas yang menggunakan metode PERT konvensional mempunyai kesalahan sekitar 14% sementara jika menggunakan metode M-PERT kesalahannya sekitar 2%.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Tidak dapat dipungkiri lagi bahwa metode penjadwalan M-PERT yang dikembangkan oleh Pablo Ballesteros-Perez ini merupakan suatu terobosan yang cukup signifikan dalam manajemen waktu proyek. Metode M-PERT ini mengoreksi beberapa kelemahan dalam metode PERT konvensional, yang paling utama adalah mengoreksi perhitungan durasi proyek total atau keseluruhan. Dalam PERT, perhitungan durasi waktu total proyek sangat fokus hanya pada jalur kritis saja dan mengabaikan jalur-jalur lain diluar jalur kritis. Dalam situasi dimana pada suatu proyek terdapat beberapa jalur paralel (yang biasanya umum terjadi), maka perhitungan ini akan menghasilkan suatu bias dalam perhitungan durasi total proyek. Metode PERT biasanya menghasilkan suatu nilai durasi total yang terlalu optimistik, mengabaikan durasi proyek total yang sebenarnya, dan sebaliknya menghasilkan suatu nilai simpangan baku yang terlalu pesimis. Dengan M-PERT, bias tersebut di reduksi dengan menggabungkan seluruh jalur yang ada menjadi hanya satu jalur seri. Akurasi metode penjadwalan M-PERT juga lebih baik dibandingkan dengan metode PERT yang konvensional.

Metode M-PERT ini juga relatif mudah diimplementasikan dan mudah dipelajari, karena perhitungan bisa dilakukan secara manual dan sederhana. Hal ini menjadikan metode M-PERT cocok untuk dipelajari

oleh mahasiswa atau profesional, terutama yang tertarik dengan manajemen waktu proyek, karena kesederhanaannya. Akhirnya, metode M-PERT ini menampilkan beberapa komponen yang baru, seperti aktifitas minima, jalur-jalur probabilistik (alternatif), dan *self-loops*.

DAFTAR PUSTAKA

- Adegoke, A.S. 2011. Measuring Process Effectiveness Using CPM / PERT. *International Journal of Bussiness and Management*. 6(6), 286-295. <https://doi.org/10.5539/ijbm.v6n6p286>
- Aribisala, A., Otenaike, A., Balogun, O., Ofusori, L. 2017. Analysis of an Engineering Project Using Program Evaluation and Review Technique. *FUOYE Journal of Engineering and Technology*. 2(1), 9-12. <https://doi.org/10.46792/fuoyejet.v2i1.49>
- Ballesteros-Pérez, P., 2017. M-PERT: Manual project-duration estimation technique for teaching scheduling basics. *Journal of construction engineering and management*. 143(9), 04017063.
- Habibi, F., Birgani, O., Koppelaar, H. and Radenović, S. 2018. Using fuzzy logic to improve the project time and cost estimation based on Project Evaluation and Review Technique (PERT). *Journal of Project Management*. 3(4), 183-196. <http://dx.doi.org/10.5267/j.jpm.2018.4.002>
- Herrerías-Velasco, J.M., Herrerías-Pleguezuelo, R., Van Dorp, J. R.. 2011. *Revisiting the PERT mean and variance*. *European Journal of Operational Research*. 210(2), 448-451. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.08.014>
- Kholil, M., Alfa, B.N., Hariadi, M. 2018. Scheduling of house development projects with CPM and PERT method for time efficiency (Case study: House type 36). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 140(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/140/1/012010>
- Malcolm, D.G., Roseboom, J.H., Clark, C.E., Fazar, W. 1959. Application of A Technique For Research And Development Program Evaluation. *Operations research*. 7(5), 646-669.
- Matthews, P. 2016. "This Is Why Construction Is So Corrupt". Available: <https://www.weforum.org/agenda/2016/02/why-is-the-construction-industry-so-corrupt-and-what-can-we-do-about-it/>