

Struktur Data

ARDIANSYAH

*Departemen Informatika
Universitas Ahmad Dahlan*

Kandidat Penerbit



Ucapan Terima Kasih

Banyak pihak terlibat dan berkontribusi selama penulisan buku ini yang persis dimulai sejak Semester Gasal 2023/2024. Oleh karena itu, halaman ini penulis dedikasikan khusus untuk menghaturkan terima kasih kepada mereka-mereka yang telah turut memberikan sumbangsuhnya:

Mahasiswa Struktur Data 211830731 Informatika UAD Kelas A & J 2023/2024, Kelas A 2024/2025. Mereka adalah pembaca generasi awal sewaktu buku ini sewaktu masih berupa lembaran catatan kuliah. Mereka pula yang menjadi “*proof-reader*” awal *cum* objek percobaan penerapan materi buku ini ke dalam perkuliahan dan praktikum. Bapak Suprihatin (SI UAD), Profesor Paulus Insap Santosa (DTETI UGM), Profesor Mhd. Reza Pulungan (FMIPA-ILKOM UGM). Dr. Rinaldi Munir (IF ITB), Dr. Dewi Pramudi Ismi (IF UAD), Xx, xx, xx dan xx untuk studi kasus Pemutar Lagu, xx, xx, dan xx untuk studi kasus Antrian Berprioritas.

Prasyarat

Agar bisa efektif memahami buku ini, paling tidak pembaca telah memahami Algoritma dan Pemrograman dalam salah satu bahasa pemrograman tingkat tinggi seperti Python, C, atau C++, dan sebagainya. Walaupun di buku ini pseudocode yang diberikan bernuansa Python.

Profil Penulis



Ardiansyah adalah Dosen dan Peneliti di Program Studi S1 Informatika dan S2 Teknik Elektro Universitas Ahmad Dahlan (UAD). Karir akademiknya dimulai sejak tahun 2004. Ardiansyah menyelesaikan S1 Teknik Informatika UAD tahun 2003 dengan judul Skripsi “*Model Pembayaran Pada Mobile Commerce*”. Studi S2 ditempuhnya hanya dalam waktu 18 bulan di Program Studi Magister Ilmu Komputer UGM dengan judul Tesis “*Aplikasi Bibliografi Digital Berbasis Social Cataloging*” yang mengantarkannya sebagai lulusan tercepat di tahun 2009-2010. Ia memungkas studi Pascasarjanya di Program Studi Doktor Teknik Elektro DTETI UGM dalam kurun waktu 3,8 tahun (2019 – 2022). Riset doktoralnya di bidang *software engineering* dengan judul Disertasi “*MUCPSO: Metode Estimasi Use Case Points xxx*”.

Ardiansyah telah mengarang xx buku, xx artikel ilmiah. Mata kuliah yang diampunya antara lain: Algoritma dan Pemrograman, Struktur Data,

Rekayasa Perangkat Lunak, Teknik Optimasi, Metodologi Penelitian, dan Penjaminan Kualitas Perangkat Lunak.

Bidang riset yang ditekuninya adalah rekayasa perangkat lunak cerdas (*intelligent software engineering*). Di sela-sela aktivitasnya, ia kerap membantu para Dosen yang hendak studi S3 di bidang Informatika dalam kegiatan Informatics Doctoral Bootcamp.

Ardiansyah pernah meraih beberapa hibah riset kompetitif antara lain Riset Dasar DRTPM tahun 2023. Saat ini Ardiansyah menjadi Ketua Kelompok Keilmuan Rekayasa Perangkat Lunak dan Data (Relata) Prodi S1 Informatika UAD.

Ardiansyah terbuka untuk kolaborasi penelitian di beberapa bidang *software engineering* antara lain: *software requirement prioritization*, *code vulnerability*, *software defect prediction*, *software effort estimation*, *software mining repositories*, dan *empirical software engineering*.

Ardiansyah bisa dihubungi melalui:

Email: ardiansyah@tif.uad.ac.id

HP: 0815 689 2648

Daftar Isi

Ucapan Terima Kasih	2
Prasyarat.....	3
Profil Penulis.....	4
Pendahuluan.....	8
Apa itu Struktur Data?	8
Mengapa belajar Struktur Data?	8
Apa bedanya Algoritma dengan Struktur Data?	9
Komponen utama struktur data	9
Contoh umum struktur data	9
Array	11
Apa itu Array	11
Ciri utama Array	11
Bentuk Array.....	11
Konsep penting Array	11
Operasi Array.....	11
Inisiasi Array.....	11
Insert satu elemen	11
Insert elemen.....	12
Hapus elemen.....	13
Latihan	14
Linked List.....	15
Konsep Umum Linked List.....	15
Node.....	15
Traverse (jelajah)	15
Linked list	15
Kepala (<i>head</i>).....	15
Ekor (<i>tail</i>).....	15
Singly Linked List.....	15
Membuat linked list	15
Menambah node di kepala (<i>head</i>).....	15

Menambah node di ekor (<i>tail</i>).....	16
Menambah Node setelah sembarang node.....	18
Menambah Node sebelum sembarang node	19
Mencetak Linked List	20
Pencarian Node	20
Menghapus Node	21
Menghapus node pada sembarang posisi setelah node kepala.....	21
Menghapus node kepala.....	23
Circular Singly Linked List	23
Mengurutkan Node	25
Mengurutkan secara menaik (<i>ascending</i>)	25
Mengurutkan secara menurun (<i>descending</i>)	25
Latihan	25
Dolby Linked List.....	26
Insert di kepala.....	26
Insert di ekor	27
Cetak Maju.....	27
Cetak Mundur	27
Studi Kasus Aplikasi Pemutar Lagu	28
Latihan	28
Bibliografi	29
Antrian (Queue)	30
Antrian menggunakan <i>array</i>	31
Menambah antrian (<i>enqueue</i>).....	31
Menghapus antrian (<i>dequeue</i>).....	33
Antrian menggunakan <i>linked list</i>	34
Latihan	35
Tumpukan (Stack).....	36
Stack representasi array	36
Menambah elemen (<i>push</i>).....	36
Menghapus elemen (<i>pop</i>).....	37
Stack representasi <i>linked list</i>	37
Latihan	38

Heap	39
Antrian Berprioritas	39
Latihan	39
Tree	40
Penambahan dan pembuatan <i>node</i>	40
Traverse	43
Binary Tree	47
Graf	47
Trie	47
Tabel Hash	47
Referensi	48

Pendahuluan

Apa itu Struktur Data?

Struktur data adalah cara **mengelola** dan **mengakses** data pada program komputer agar bisa **efisien, efektif** dalam pengoperasiannya seperti **pencarian, penyortiran, dan manipulasi** data.

Mengapa belajar Struktur Data?

Struktur Data adalah bagian yang melekat dalam suatu algoritma. Setelah Anda belajar dasar pemrograman dan algoritma, maka penguasaan struktur data adalah mutlak. Tanpa paham struktur data, maka algoritma yang Anda gunakan bisa dipertanyakan efektivitas dan efisiensinya. Jika dibuat dalam bentuk daftar, maka berikut ini adalah beberapa alasan mengapa belajar struktur data itu sangat penting.

1. Efisiensi Algoritma

Efisiensi adalah kunci dalam suatu program. Kita harus mampu mengoptimalkan sumber daya komputasi yang dimiliki yang kadang terbatas. Pemahaman yang baik dalam memilih struktur data yang tepat dan cocok untuk kasus atau tugas tertentu memberi dampak besar pada efisiensi algoritma. Dengan kata lain, struktur data yang tepat bisa mengoptimalkan waktu eksekusi dan penggunaan memori komputer.

2. Penyelesaian masalah yang kompleks

Selain efisiensi, pemilihan struktur data yang tepat berarti menunjukkan kemampuan kita dalam merepresentasikan dan memanipulasi data untuk masalah yang sesuai yang pada gilirannya membantu kita dalam memecahkan permasalahan yang kompleks. Dengan kata lain, tantangan pemrograman yang sulit bisa diatasi dengan pemilihan struktur data yang tepat.

3. Kemampuan analisis

Salah satu kompetensi orang Informatika adalah kemampuan analisis. Belajar struktur data mengasah keterampilan kita dalam menganalisis data. Apalagi saat ini penguasaan ilmu tentang data menjadi sangat diperlukan di era saat ini. Dengan penguasaan struktur data kita bisa mengelola, mengolah, dan menganalisis data dengan lebih efektif yang sangat diperlukan dalam dunia bisnis dan penelitian

4. Pengembangan software yang scalable

Salah satu bentuk dari permasalahan yang kompleks adalah ketika kita menjumpai suatu perangkat lunak yang semakin hari makin kompleks dan besar. Apabila kita menjadi bagian di dalamnya, maka pemilihan struktur data yang tepat bisa mempermudah softwarenya terus diperluas sehingga bisa tetap mengelola pertumbuhan data yang berkelanjutan sambil tetap bisa menjaga kinerja aplikasinya optimal.

5. Standar industri

Struktur data adalah konsep umum yang digunakan dalam dunia pemrograman dan Informatika. Banyak bahasa pemrograman dan kerangka kerja yang didasarkan pada penggunaan struktur data tertentu. Oleh karena itu, pemahaman struktur data yang baik akan membantu Anda untuk beradaptasi dengan berbagai teknologi dan lingkungan pengembangan software.

6. Persiapan untuk wawancara kerja

Hampir di setiap wawancara kerja untuk lowongan programmer selalu ada pertanyaan berupa struktur data untuk memecahkan permasalahan yang diberikan. Pertanyaan ini diajukan untuk mengetahui sejauh mana pemahaman Anda dalam penggunaan struktur data. Jika Anda sudah memahami dan menguasai dengan baik tentu sangat membantu dalam melewati wawancara kerja tersebut

Apa bedanya Algoritma dengan Struktur Data?

Komponen utama struktur data

Beberapa komponen utama struktur data yaitu:

1. Elemen data

Elemen data merupakan unit dasar suatu data yang ingin kita simpan atau proses. Sebagai contoh pada daftar nama karyawan, **setiap nama** di dalam daftar tersebut merupakan **elemen data**. Begitu pula misalnya daftar nilai ujian mahasiswa, elemen datanya adalah **setiap nilai ujian** di dalam daftar tersebut.

2. Tipe data

Tipe data adalah jenis nilai yang dapat disimpan dalam struktur data seperti integer, string, karakter, objek atau bahkan record

3. Keterkaitan data

Keterkaitan data adalah cara elemen data memiliki kaitan satu sama lain. Data dapat dihubungkan secara linear, hirarkis, atau bahkan berupa jaringan kompleks

4. Operasi data

Operasi data merupakan tindakan yang dapat dilakukan pada struktur data seperti penambahan, penghapusan, pencarian, penyortiran, atau iterasi melalui elemen-elemen data.

Contoh umum struktur data

Berikut ini adalah beberapa contoh struktur data yang biasanya dipelajari dalam mata kuliah struktur data yaitu:

1. Array

Kumpulan elemen data bertipe sama yang posisi elemennya saling berdempetan (contiguous) dan diakses melalui indeks

2. Linked list

Struktur berantai dari simpul-simpul (node) yang menghubungkan elemen data satu sama lain.

3. Stack

Struktur data LIFO (Last-In, First-Out) yang mengelola elemen data dengan prinsip tumpukan

4. Queue

Struktur data FIFO (First-In, First-Out) yang mengelola elemen data menggunakan prinsip antrian

5. Tree

Struktur data hirarkis yang mengorganisasi elemen data dalam bentuk pohon

6. Graf

Struktur data yang merepresentasikan hubungan antara objek dalam jaringan yang kompleks

7. Hash table

Struktur data yang digunakan untuk mencari data dengan cepat menggunakan fungsi hash

Setiap struktur data tersebut selanjutnya akan dibahas secara lengkap pada bab-bab berikutnya di dalam buku ini.

Array

Tujuan Pembelajaran

Capaian Pembelajaran

Apa itu Array

Definisi array bisa dilihat dari dua konteks. Ketika belajar algoritma dan pemrograman, array bisa disebut sebagai variabel. Sedangkan ketika belajar struktur data, maka array merupakan salah satu struktur data yang mengelola kumpulan elemen yang posisi antarelelemen berdempetan/berurutan satu sama lain (contiguous) dan diakses menggunakan indeks.

Ciri utama Array

Array memiliki ciri utama antara lain:

1. Memiliki banyak sel
2. Tiap sel bisa menampung nilai atau elemen
3. Tiap sel berlokasi berurutan
4. Tiap sel memiliki indeks yang dimulai dari indeks nol (0)
5. Memiliki ukuran yang menunjukkan banyaknya sel
6. Bertipe data tunggal. Artinya satu array hanya bisa bertipe integer, string, atau float saja

Bentuk Array

Bentuk umum array

Contoh array bertipe string

Contoh array bertipe integer

Contoh array bertipe real

Konsep penting Array

Ukuran array \neq indeks array

Ukuran array = indeks terakhir + 1

Indeks terakhir = ukuran array - 1

Kata **elemen**, **nilai**, dan **data** memiliki makna yang sama dan sering digunakan secara bergantian. Jadi pastikan Anda tidak bingung.

Operasi Array

Inisiasi Array

array = []

Insert satu elemen

Sama saja dengan insert elemen di belakang array atau *head*

nilai1 = 3

[3]

nilai2 = 7

[3, 7]

Nilai3 = 2

[3, 7, 2]

Nilai4 = 9

[3, 7, 2, 9]

Insert elemen

Bila diberikan array [3, 7, 2, 9], maka yang dimaksud dengan insert elemen di tengah adalah menambahkan elemen di antara indeks pertama dan indeks terakhir. Sehingga beberapa hal yang perlu dipersiapkan untuk menginsert elemen di tengah adalah:

- Indeks atau posisi elemen baru akan diletakkan
- Elemen yang akan ditambahkan
- Siapkan array temporary untuk menampung array utama
- Perbesar ukuran array utama

Misal:

newValue = 11

Posisi = 2

ArrSize = 4

Hasil yang diharapkan: [3, 7, 11, 2, 9]

Caranya

- Salin array utama ke array temporary
- Kosongkan array utama
- Perbesar ukuran array utama
- Insert seluruh elemen array temporary ke array utama

```
1. fungsi insertArray(values, newValue, position, arraySize)
2.   tempValues = values
3.   values = []
4.   values(arraySize + 1)
5.   for i=0, i<arraySize, i++
6.     values[i] = tempValues[i]
7.   for i=arraySize, i>position, i--
8.     values[i] = tempValues[i-1]
9.   values[position] = newValue
10.  return data
```

Eksekusi Utama

Baris-2	tempValues = [3, 7, 2, 9]	[3, 7, 2, 9]
Baris-3	Values = []	[]
Baris-4	Values[4+1]	[None, None, None, None, None]
Baris-5	For i=0, 0<4, 1++	True

Baris-6	Values[0] = 3	[3, None, None, None, None]
Baris-5	For i=1, 1<4, 2++	True
Baris-6	Values[1] = 7	[3, 7, None, None, None]
Baris-5	For i=2, 2<4, 3++	True
Baris-6	Values[2] = 2	[3, 7, 2, None, None]
Baris-5	For i=3, 3<4, 4++	True
Baris-6	Values[3] = 9	[3, 7, 2, 9, None]
Baris-5	For i=4, 4<4, 5++	False
Baris-7	For i=4, 4>2, 3--	True
Barus-8	values[4] = 9	[3, 7, 2, 9, 9]
Baris-7	For i=3, 3>2, 2--	True
Barus-8	values[3] = 2	[3, 7, 2, 2, 9]
Baris-7	For i=2, 2>2, 1--	True
Barus-8	values[2] = 7	[3, 7, 7, 2, 9]
Baris-7	For i=1, 1>2, 0--	False
Baris-9	Values[2] = 11	[3, 7, 11, 2, 9]
Baris-10	Return [3, 7, 11, 2, 9]	

Intinya, untuk menambahkan elemen di tengah berarti kita harus memperbesar ukuran array utama. Konsekuensinya kita membutuhkan array sementara, lalu memasukkannya kembali ke array utama yang sudah diperbesar, diakhir dengan menggeser tiap elemen hingga ketemu posisi elemen baru untuk ditempatkan.

Artinya, untuk melakukan insert pada array membutuhkan aktivitas yang lumayan banyak, menandakan bahwa struktur data ini memiliki efisiensi yang rendah.

Hapus elemen

```

1. fungsi delArray(values, arrSize, posisi)
2.   tempValues([arrSize]) //deklarasi array dengan ukuran=arrSize
3.   for i=posisi, i<arrSize-1, i++)
4.     values[i] = values[i+1]
5.   tempValues = values
6.   values([arrSize-1]) //deklarasi array dengan ukuran=arrSize-1
7.   for i=0, i<arrSize-1, i++
8.     values[i] = tempValues[i]
9.   return values

```

values = [9, 8, 3, 11, 2]

posisi = 1

arrSize = 5

Baris-1	Fungsi delArray([9, 8, 3, 11, 2], 5, 1)	
---------	---	--

Baris-2	tempValues([arrSize])	[None, None, None, None, None]
Baris-3	For i=1, i<5-1, 2++	True
Baris-4	Values[1] =	[9, 3, 3, 11, 2]
Baris-3	For i=2, 2<5-1, 3++	True
Baris-4	Values[2] = 11	[9, 3, 11, 11, 2]
Baris-3	For i=3, 3<5-1, 4++	True
Baris-4	Values[3] = 2	[9, 3, 11, 2, 2]
Baris-3	For i=4, 4<5-1, 5++	false
Baris-5	tempValues = [9, 3, 11, 2, 2]	[9, 3, 11, 2, 2]
Baris-6	Values([arrSize-1])	[None, None, None, None]
Baris-7	For i=0, 0<5-1, 1++	True
Baris-8	Values[0] = 9	[9, None, None, None]
Baris-7	For i=1, 1<5-1, 2++	True
Baris-8	Values[1] = 3	[9, 3, None, None]
Baris-7	For i=2, 2<5-1, 3++	True
Baris-8	Values[2] = 11	[9, 3, 11, None]
Baris-7	For i=3, 3<5-1, 4++	True
Baris-8	Values[3] = 2	[9, 3, 11, 2]
Baris-7	For i=4, 4<5-1, 5++	False
Baris-9	Return [9, 3, 11, 2]	

Latihan

1. Diberikan array berikut:

72	110	12	66	90
----	-----	----	----	----

Hilangkanlah elemen Null pada array tersebut sehingga array-nya menjadi:

72	12	66	90
----	----	----	----

Linked List

Jika pada array, data disimpan dalam satu grup blok memori yang letak tiap datanya berurutan. Maka, bagaimana jika datanya disimpan secara tersebar di memori? Inilah yang mendasari dibutuhkannya linked list. Pada linked list data disimpan dalam sebuah *node* atau simpul. Setiap simpul terdiri dari dua sel memori. Sel pertama berisi data atau nilai. Sedangkan sel kedua berisi alamat ke simpul berikutnya.

Konsep Umum Linked List

Node

Traverse (jelajah)

Linked list

Kepala (*head*)

Ekor (*tail*)

Konsep utama linked list:

1. Data terletak terpisah-pisah di memori
2. Tiap data direpresentasikan dalam bentuk *node*
3. Tiap *node* menggunakan dua sel memori
4. Sel pertama berisi nilai data, sel kedua berisi alamat ke node berikutnya
5. Node paling kiri disebut *head*, dan node paling kanan disebut *tail*
6. Untuk node *tail* alamat berikutnya selalu *null* atau *none*

Singly Linked List

Membuat linked list

Membuat list dimulai dari menginisiasi linked list kosong. Setelah diinisiasi, dilanjutkan dengan membuat node-node. Penempatan node ke dalam linked list ada dua macam yaitu, penempadan di kepala atau di ekor.

Menambah node di kepala (*head*)

```
1. def createNode(data):
2.     return {'data': data, 'next': None}
3.
4. def insertAtHead(linkedList, data):
5.     newNode = createNode(data)
6.     newNode['next'] = linkedList
7.     return newNode
8.
9. data = ['universitas', 'ahmad', 'dahlan']
10. linkedList = None
11. for item in data:
12.     linkedList = insertAtHead(linkedList, item)
```

Baris	Skrip	Output/Status
4	Def insertAtHead(None, 'universitas')	
5	newNode = createNode('universitas')	{'data': 'universitas', 'next':None}
6	newNode['next'] = None	
7	Return {'data': 'universitas', 'next':None}	
4	Def insertAtHead({'data': 'universitas', 'next':None}, 'ahmad')	
5	newNode = createNode('ahmad')	{'data': 'ahmad', 'next':None}
6	newNode['next'] = {'data': 'universitas', 'next':None},	{'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'universitas', 'next':None}}
7	Return {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'universitas', 'next':None}}	
4	Def insertAtHead({'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'universitas', 'next':None}}, 'dahlan')	
5	newNode = createNode('dahlan')	{'data': 'dahlan', 'next':None}
6	newNode['next'] = {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'universitas', 'next':None}}	{'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'universitas', 'next':None}}}
7	Return {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'universitas', 'next':None}}}	

Menambah node di ekor (*tail*)

<pre> 1. def createNode(data): 2. return {'data': data, 'next': None} 3. 4. def insertAtTail(linkedList, data): 5. newNode = createNode(data) 6. 7. if linkedList is None: 8. return newNode 9. 10. current = linkedList 11. 12. while current['next'] is not None: 13. current = current['next'] 14. 15. current['next'] = newNode 16. 17. return linkedList 18. 19. data = ['universitas', 'ahmad', 'dahlan', 'PTM'] 20. linkedList = None 21. for item in data: 22. linkedList = insertAtTail(linkedList, item) </pre>
--

Eksekusi

Baris	Skrip	Output/Status
-------	-------	---------------

20	linkedList = None	None
21	for 'universitas' in ['universitas', 'ahmad', 'dahlan']	
22	linkedList = insertAtTail(None, 'universitas')	
4	def insertAtTail(None, 'universitas')	
5	newNode = createNode('universitas')	
1	def createNode('universitas')	
2	return {'data': 'universitas', 'next':None}	
7	if None is None:	True
8	return {'data': 'universitas', 'next':None}	
21	for 'ahmad' in ['universitas', 'ahmad', 'dahlan']	
22	linkedList = insertAtTail({'data': 'universitas', 'next':None}, 'ahmad')	
4	def insertAtTail({'data': 'universitas', 'next':None}, 'ahmad')	
5	newNode = createNode('ahmad')	
1	def createNode('ahmad')	
2	return {'data': 'ahmad', 'next':None}	
7	if {'data': 'universitas', 'next':None} is None	False
10	current = {'data': 'universitas', 'next':None}	
12	while None is not None:	False
15	current['next'] = {'data': 'ahmad', 'next':None}	{'data': 'universitas', 'next': {'data': 'ahmad', 'next':None}}
17	return {'data': 'universitas', 'next': {'data': 'ahmad', 'next':None}}	
21	for 'dahlan' in ['universitas', 'ahmad', 'dahlan']	
22	linkedList = insertAtTail({'data': 'universitas', 'next': {'data': 'ahmad', 'next':None}}, 'dahlan')	
4	def insertAtTail({'data': 'universitas', 'next': {'data': 'ahmad', 'next':None}}, 'dahlan')	
5	newNode = createNode('dahlan')	
1	def createNode(dahlan')	
2	return {'data': 'dahlan', 'next':None}	
7	if {'data': 'universitas', 'next': {'data': 'ahmad', 'next':None}} is None	False
10	current = {'data': 'universitas', 'next': {'data': 'ahmad', 'next':None}}	
12	while {'data': 'ahmad', 'next':None} is not None	True
13	current = {'data': 'ahmad', 'next':None}	{'data': 'ahmad', 'next':None}
12	while None is not None	False
15	current['next'] = {'data': 'dahlan', 'next':None}	{'data': 'ahmad', 'next': { 'data': 'dahlan', 'next':None}}
17	return {'data': 'universitas', 'next': {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'dahlan', 'next':None}}}	

Menambah Node setelah sembarang node

Selain menempatkan atau menambahkan node di kepala atau di ekor, kita juga bisa menambahkan node setelah atau sebelum node tertentu. Dengan demikian, kita sama saja melakukan pencarian node menggunakan keyword tertentu yang selanjutnya akan membuat node baru sebelum atau setelah node yang ditemukan tersebut.

```
1. def insertAfterNode(linkedList, targetData, newData):
2.     newNode = createNode(newData)
3.     current = linkedList
4.     while current:
5.         if current['data'] == targetData:
6.             newNode['next'] = current['next']
7.             current['next'] = newNode
8.             return linkedList
9.         current = current['next']
10.
11. targetData = 'ahmad'
12. newData = 'muhammadiyah'
13. insertAfterNode(linkedList, targetData, newData)
```

Misalnya linked list saat ini:

```
{'data': 'universitas', 'next': {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': None}}}
```

Baris	Skrip	Output/Status
2	<code>newNode = {'data': 'muhammadiyah', 'next': None}</code>	<code>{'data': 'muhammadiyah', 'next': None}</code>
3	<code>Current = {'data': 'universitas', 'next': {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': None}}}</code>	<code>{'data': 'universitas', 'next': {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': None}}}</code>
4	<code>While {'data': 'universitas', 'next': {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': None}}}</code>	true
5	<code>If 'universitas' == 'ahmad'</code>	False
10	<code>Current = {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': None}}</code>	<code>{'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': None}}</code>
4	<code>While {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': None}}</code>	true
5	<code>If 'ahmad' == 'ahmad'</code>	True
6	<code>newNode['next'] = {'data': 'dahlan', 'next': None}</code>	<code>{'data': 'muhammadiyah', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': None}}</code>

--	--	--

Menambah Node sebelum sembarang node

```

1. def insertBeforeNode(linkedList, targetData, newData):
2.     newNode = createNode(newData)
3.     current = linkedList
4.
5.     while current is not None and current['next'] is not None:
6.         if current['next']['data'] == targetData:
7.             newNode['next'] = current['next']
8.             current['next'] = newNode
9.             return linkedList
10.        current = current['next']
11.
12. targetData = 'dahlan'
13. newData = 'muhammadiyah'
14. insertAfterNode(linkedList, targetData, newData)

```

Misalnya linked list saat ini:

```

{'data': 'universitas',
 'next': {'data': 'ahmad',
          'next': {'data': 'dahlan',
                   'next': {'data': 'PTM',
                             'next': None}}}}

```

Baris	Skrip	Output/Status
2	newNode = {'data': 'muhammadiyah', 'next': None}	{'data': 'muhammadiyah', 'next': None}
3	Current = {'data': 'universitas', 'next': {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}}}	{'data': 'universitas', 'next': {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}}}
5	while {'data': 'universitas', 'next': {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}}} and {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}}	True and true
6	If 'ahmad' == 'dahlan'	false
10	Current = {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}}	{'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}}

5	While {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}}} and {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}	True and true
6	If 'dahlan' == 'dahlan'	true
7	newNode['next'] = {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}	{'data': 'muhammadiyah', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}}
8	current['next'] = {'data': 'muhammadiyah', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}}	{'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'muhammadiyah', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}}}
9	Return {'data': 'universitas', 'next': {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'muhammadiyah', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}}}}	

Mencetak Linked List

Mencetak linked list berarti kita akan menampilkan data pada node.

Linked list saat ini

```
{'data': 'universitas', 'next': {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': None}}}
```

```
1. fungsi printLinkedList(linkedList)
2. while linkedList:
3.     print(linkedList ['data'], end='->')
4.     linkedList = linkedList ['next']
5.     print('none')
```

```
printLinkedList(linkedList)
```

Output: universitas->ahmad->dahlan->none

Linked list saat ini

```
{'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'universitas', 'next': None}}}
```

Output: dahlan->ahmad->universitas->none

Pencarian Node

Mencari node berarti hendak menemukan apakah keyword yang diberikan terdapat atau sama pada data yang tersimpan pada node-node. Dengan demikian kita harus membaca tiap node satu per satu hingga ditemukan atau hingga node terakhir.

Dari aspek teknis, teknik cetak linked list bisa kita gunakan pada pencarian node.

```
1. def searchLinkedList(linkedList, target):
2.     while linkedList is not None:
3.         if linkedList['data'] == target:
```

```

4.         return linkedList
5.         linkedList = linkedList['next']
6.         return None

```

```

target = 'dahlan'
if searchLinkedList(linkedList, target):
    print('keyword', target, 'ditemukan')
else:
    print('keyword', target, 'tidak ditemukan')

```

Misalnya Linked list saat ini

```
{'data': dahlan, 'next': {'data': 'ahmad', 'next': {'data': universitas, 'next': None}}}
```

Ketika dieksekusi, maka tahapannya seperti berikut:

Baris-2	While linkedList	True
Baris-3	If 'dahlan' == 'dahlan'	True
Baris-4	Return linkedList	keyword dahlan ditemukan

Misalnya linked list saat ini:

```
{'data': 'universitas', 'next': {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': None}}}
```

Ketika dieksekusi, maka tahapannya seperti berikut:

Baris-2	while linkedList	true
Baris-3	if 'universitas' == 'dahlan'	false
Baris-5	linkedList = {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': none}}	
Baris-2	while linkedList	true
Baris-3	if 'ahmad' == 'dahlan'	false
Baris-5	linkedList = {'data': 'dahlan', 'next': none}	
Baris-2	while linkedList	true
Baris-3	if 'dahlan' == 'dahlan'	false
Baris-4	return linkedList	keyword dahlan ditemukan

Output: keyword dahlan ditemukan

Menghapus Node

Menghapus node berarti membuang sebuah node dari sebuah linked list. Ada beberapa kemungkinan penghapusan node yaitu:

Menghapus node pada sembarang posisi setelah node kepala

Prinsip kerjanya adalah:

- Iterasi tiap node sambil mengecek apakah data simpul sama dengan data target
- Jika tidak sama, maka update linked list dengan membuang node yang tidak sama

- c. Jika sama maka arahkan 'next' linked list saat ini ke node 'next' 'next', alias melompati node yang dihapus

```

1. def deleteNode(linkedList, targetData):
2.     current = linkedList
3.     while current['next']:
4.         if current['next']['data'] == targetData:
5.             current['next'] = current['next']['next']
6.             return linkedList
7.         current = current['next']
8.
9. targetData = 'dahlan'
10. deleteNode(linkedList, targetData)

```

Linked list saat ini:

```

{'data': 'universitas',
 'next': {'data': 'ahmad',
          'next': {'data': 'muhammadiyah',
                   'next': {'data': 'dahlan',
                            'next': {'data': 'PTM',
                                       'next': None}}}}}

```

Baris	Skrip	Output/Status
2	Current = {'data': 'universitas', 'next': {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'muhammadiyah', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}}}}{'data': 'universitas', 'next': {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'muhammadiyah', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}}}}	
3	while {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'muhammadiyah', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}}}	true
4	If 'ahmad' == 'dahlan'	False
7	Current = {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'muhammadiyah', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}}}	{'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'muhammadiyah', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}}}
3	while {'data': 'muhammadiyah', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}}	true
4	If 'muhammadiyah' == 'dahlan'	False
7	Current = {'data': 'muhammadiyah', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}}	{'data': 'muhammadiyah', 'next': {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}}

3	While {'data': 'dahlan', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}	True
4	If 'dahlan' == 'dahlan'	True
5	Current['next'] = {'data': 'muhammadiyah', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}	{'data': 'muhammadiyah', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}
6	Return {'data': 'universitas', 'next': {'data': 'ahmad', 'next': {'data': 'muhammadiyah', 'next': {'data': 'PTM', 'next': None}}}}	

Menghapus node kepala

Mungkin pembaca ada yang bertanya-tanya, mengapa operasi penghapusan *node* di ekor tidak dibahas? Jawabannya memang disengaja. Karena nanti penghapusan *node* di ekor dibahas sekalian pada materi *dequeue* antrian berbentuk *linked list*. Silakan lihat pada subbab xx.

Circular Singly Linked List

Circular linked list berarti antara node kepala dan node ekor terhubung. Dengan kata lain, node ekor akan merujuk ke node kepala.

```

1. def createSong(song):
2.     return {'song': song, 'next': None}
3.
4. def insertSong(playLists, song):
5.     newSong = createSong(song)
6.     if not playLists:
7.         newSong['next'] = newSong
8.         return newSong
9.
10. playLists = None
11. playLists = insertSong(playLists, 'Satu')
12.
13. print("Play lists lagu Dewa 19:")
14. print(playLists)

```

Eksekusi

Baris	Skrip	Output/Status
10	playLists = None	None
11	playLists = insertSong(None, 'Satu')	
4	def insertSong(None, 'Satu')	
5	newSong = createSong('Satu')	
1	def createSong('Satu')	
2	return {'song': 'Satu' 'next': None}	
5	newSong = {'song': 'Satu' 'next': None}	{'song': 'Satu' 'next': None}
6	if not None:	True
7	newSong['next'] = {'song': 'Satu' 'next': None}	{'song': 'Satu' 'next': {...}}
8	return {'song': 'Satu' 'next': {...}}	

Linked list saat ini: {'song': 'Satu' 'next': {...}}

Perlu diingat bahwa tanda {...} menunjukkan bahwa *next* menunjuk ke *node* yang sama kembali, alias ke node kepala.

```

1. def createSong(song):
2.     return {'song': song, 'next': None}
3.
4. def insertSong(playLists, song):
5.     newSong = createSong(song)
6.
7.     if not playLists:
8.         newSong['next'] = newSong
9.         return newSong
10.    else:
11.        tempPlayLists = playLists
12.
13.        while tempPlayLists['next'] != playLists:
14.            tempPlayLists = tempPlayLists['next']
15.
16.        tempPlayLists['next'] = newSong
17.        newSong['next'] = playLists
18.
19.    return playLists
20.
21. playLists = None
22. playLists = insertSong(playLists, 'Satu')
23. playLists = insertSong(playLists, 'Dewi')
24. playLists = insertSong(playLists, 'Kangen')

```

Eksekusi

Baris	Skrip	Output/Status
23	playLists = insertSong({'song': 'Satu' 'next': {...}}, 'Dewi')	
4	def insertSong({'song': 'Satu' 'next': {...}}, 'Dewi')	
5	newSong = createSong('Dewi')	
1	def createSong('Dewi')	
2	return {'song': 'Dewi' 'next': None}	
5	newSong = {'song': 'Dewi' 'next': None}	{'song': 'Dewi' 'next': None}
6	if not {'song': 'Satu' 'next': {...}}:	False
10	else:	True
11	tempPlayLists = {'song': 'Satu' 'next': {...}}	
13	while {'song': 'Satu' 'next': {...}} != {'song': 'Satu' 'next': {...}}: False	
16	tempPlayLists['next'] = {'song': 'Dewi' 'next': None}	
	Output: tempPlayLists = {'song': 'Satu' 'next': {'song': 'Dewi' 'next': None}} playLists = {'song': 'Satu' 'next': {'song': 'Dewi' 'next': None}}	
17	newSong['next'] = {'song': 'Satu' 'next': {'song': 'Dewi' 'next': None}} #output: newSong = {'song': 'Dewi' 'next': {'song': 'Satu' 'next': {...}}} #output: playLists = {'song': 'Satu' 'next': {'song': 'Dewi' 'next': {...}}}	
19	return {'song': 'Satu' 'next': {'song': 'Dewi' 'next': {...}}}	
24	playLists = insertSong({'song': 'Satu' 'next': {'song': 'Dewi' 'next': {...}}}, 'Kangen')	
4	def insertSong({'song': 'Satu' 'next': {'song': 'Dewi' 'next': {...}}}, 'Kangen')	
5	newSong = createSong('Kangen')	
1	def createSong('Kangen')	
2	return {'song': 'Kangen' 'next': None}	
5	newSong = {'song': 'Kangen' 'next': None}	{'song': 'Kangen' 'next': None}

6	if not {'song': 'Satu' 'next': {'song': 'Dewi' 'next': {...}}}: 'next': {...}}}::	False
10	else:	True
11	tempPlayLists = {'song': 'Satu' 'next': {'song': 'Dewi' 'next': {...}}} output: tempPlayLists['next'] = {'song': 'Dewi' 'next': {...}}	
13	while {'song': 'Dewi' 'next': {...}} != {'song': 'Satu' 'next': {'song': 'Dewi' 'next': {...}}}: True	
14	tempPlayLists = {'song': 'Dewi' 'next': {...}} output: tempPlayLists['next'] = {...}	
16	tempPlayLists['next'] = {'song': 'Kangen' 'next': None} output: tempPlayLists = {'song': 'Dewi' 'next': {'song': 'Kangen' 'next': None}} output: playLists = {'song': 'Satu' 'next': {'song': 'Dewi' 'next': {'song': 'Kangen' 'next': None}}}	
17	newSong['next'] = {'song': 'Satu' 'next': {'song': 'Dewi' 'next': {'song': 'Kangen' 'next': None}}} output: newSong = {'song': 'Kangen' 'next': {'song': 'Satu' 'next': {'song': 'Dewi' 'next': {...}}}} output: playLists = {'song': 'Satu' 'next': {'song': 'Dewi' 'next': {'song': 'Kangen' 'next': {...}}}}	
19	return {'song': 'Satu' 'next': {'song': 'Dewi' 'next': {'song': 'Kangen' 'next': {...}}}}	

Sebagai catatan. Agar seluruh baris kode bisa dieksekusi, maka dibutuhkan paling tidak ada tiga data yang membentuk tiga *node* dalam *linked list*.

Mengurutkan Node

Mengurutkan secara menaik (*ascending*)

Mengurutkan secara menurun (*descending*)

Latihan

1. Diberikan persamaan berikut

$$f(x) = \sum_{i=1}^5 x_i^2$$

Gambarlah bentuk *linked list* nya, lalu buatlah code/pseudocode nya. Cetaklah tiap nilainya beserta hasil akhir fungsi tersebut.

Output:

Gambar

Nilai 1^2 , dst

Total/jumlah

Dolby Linked List

Konsep utama *dolby linked list* (DLL) adalah :

1. Tiap *node* memiliki penunjuk ke *node* sebelum (*previous*) dan penunjuk ke *node* berikutnya (*next*)
2. *Node* pertama memiliki penunjuk *prev* ke *Null* atau *None*

Insert di kepala

Prinsip kerjanya sama dengan *singly linked list* yaitu tiap *node* lama akan bergeser ke ekor tiap kali ada *node* baru yang ditambahkan.

1. Jika linked list kosong, maka linked list hanya terdiri dari satu *node*, dengan *prev* dan *next* bernilai *None*
2. Jika linked list terisi, maka:
 - Penunjuk *next* node baru yang *None* diarahkan ke *linked list* saat ini
 - Penunjuk *prev linked list* saat ini yang *None* diarahkan ke node baru
 - Retun fungsi adalah node baru

```
1. def createNewSong(title):
2.     return {'title': title, 'prev':None, 'next':None}
3.
4. def addSongList(playList, title):
5.     newSong = createNewSong(title)
6.     if playList is None:
7.         return newSong
8.
9.     newSong['next'] = playList
10.    playList['prev'] = newSong
11.
12.    return newSong
13.
14. playList = None
15. playList = addSongList(playList, 'Angin')
16. playList = addSongList(playList, 'Satu')
17. playList = addSongList(playList, 'Kirana')
```

Eksekusi

14	playList = None
15	playList = addSongList(None, 'Angin')
4	def addSongList(None, 'Angin')
5	newSong = createNewSong('Angin')
1	def createNewSong('Angin')
2	return {'title': 'Angin', 'prev':None, 'next':None}
5	newSong = {'title': 'Angin', 'prev':None, 'next':None}
	# playList = None
6	if None is None:
	# True
7	return {'title': 'Angin', 'prev':None, 'next':None}
15	playList = {'title': 'Angin', 'prev':None, 'next':None}
16	playList = addSongList(None, 'Satu')
4	def addSongList(None, 'Satu')
5	newSong = createNewSong('Satu')
1	def createNewSong('Satu')

2	return {'title': 'Satu', 'prev':None, 'next':None}
5	newSong = {'title': 'Satu', 'prev':None, 'next':None} # playlist = {'title': 'Angin', 'prev':None, 'next':None}
6	if {'title': 'Angin', 'prev':None, 'next':None} is None # False # newSong['next'] = None
9	newSong['next'] = {'title': 'Angin', 'prev':None, 'next':None} # newSong = {'title': 'Satu', 'prev':None, 'next': {'title': 'Angin', 'prev':None, 'next':None}} # playlist['prev'] = None
10	playlist['prev'] = {'title': 'Satu', 'prev':None, 'next': {'title': 'Angin', 'prev':None, 'next':None}} # newSong = {'title': 'Satu', 'prev':None, 'next': {'title': 'Angin', 'prev':{...}, 'next':None}}
12	return {'title': 'Satu', 'prev':None, 'next': {'title': 'Angin', 'prev':{...}, 'next':None}}
17	playlist = addSongList(None, 'Kirana')
4	def addSongList(None, 'Kirana')
5	newSong = createNewSong('Kirana')
1	def createNewSong('Kirana')
2	return {'title': 'Kirana', 'prev':None, 'next':None}
5	newSong = {'title': 'Kirana', 'prev':None, 'next':None} # playlist = {'title': 'Satu', 'prev':None, 'next': {'title': 'Angin', 'prev':{...}, 'next':None}}
6	if {'title': 'Satu', 'prev':None, 'next': {'title': 'Angin', 'prev':{...}, 'next':None}} is None # False # newSong['next'] = None
9	newSong['next'] = {'title': 'Satu', 'prev':None, 'next': {'title': 'Angin', 'prev':{...}, 'next':None}} # newSong = {'title': 'Kirana', 'prev':None, 'next': {'title': 'Satu', 'prev':None, 'next': {'title': 'Angin', 'prev':{...}, 'next':None}}} # playlist['prev'] = None
10	playlist['prev'] = {'title': 'Kirana', 'prev':None, 'next': {'title': 'Satu', 'prev':None, 'next': {'title': 'Angin', 'prev':{...}, 'next':None}}} # newSong = {'title': 'Kirana', 'prev':None, 'next': {'title': 'Satu', 'prev':{...}, 'next': {'title': 'Angin', 'prev':{...}, 'next':None}}}
12	return {'title': 'Kirana', 'prev':None, 'next': {'title': 'Satu', 'prev':{...}, 'next': {'title': 'Angin', 'prev':{...}, 'next':None}}}

Insert di ekor

Cetak Maju

Cetak Mundur

Prinsip cetak mundur adalah:

1. Telusuri *linked list* hingga *node* ekor menggunakan penunjuk 'next'.
 2. Telusuri *linked list* hingga *node* kepala menggunakan penunjuk 'prev' sambil mencetak data tiap *node*.
- Tiap loop akan memperbarui *linked list* dengan penunjuk *linked list* 'prev'

1.	fungsi printBackward(songList):
2.	tempSongList = songList
3.	
4.	while tempSongList['next'] != None:
5.	tempSongList = tempSongList['next']
6.	
7.	while tempSongList != None:
8.	print(tempSongList['title'])
9.	tempSongList = tempSongList['prev']
10.	

11. printBackward(songList)

Eksekusi

Linked list saat ini:

```
{'title': 'Kirana', 'prev':None, 'next':
{'title': 'Satu', 'prev':{...}, 'next':
{'title': 'Angin', 'prev':{...}, 'next':None}}}
```

11	printBackward({'title': 'Kirana', 'prev':None, 'next': {'title': 'Satu', 'prev':{...}, 'next': {'title': 'Angin', 'prev':{...}, 'next':None}}})
1	fungsi printBackward({'title': 'Kirana', 'prev':None, 'next': {'title': 'Satu', 'prev':{...}, 'next': {'title': 'Angin', 'prev':{...}, 'next':None}}})
2	tempSongList = {'title': 'Kirana', 'prev':None, 'next': {'title': 'Satu', 'prev':{...}, 'next': {'title': 'Angin', 'prev':{...}, 'next':None}}} # tempSongList['next'] = {'title': 'Satu', 'prev':{...}, 'next': {'title': 'Angin', 'prev':{...}, 'next':None}}
4	while {'title': 'Satu', 'prev':{...}, 'next': {'title': 'Angin', 'prev':{...}, 'next':None}} != None # True
5	tempSongList = {'title': 'Satu', 'prev':{...}, 'next': {'title': 'Angin', 'prev':{...}, 'next':None}} # tempSongList['next'] = {'title': 'Angin', 'prev':{...}, 'next':None}
4	while {'title': 'Angin', 'prev':{...}, 'next':None} # True
5	tempSongList = {'title': 'Angin', 'prev':{...}, 'next':None} # tempSongList['next'] = None
4	While None is not None # False
7	while {'title': 'Angin', 'prev':{...}, 'next':None} != None: # True
8	print('Angin') # tempSongList['prev'] = {'title': 'Satu', 'prev': {'title': 'Kirana', 'prev': None, 'next': {...}}, 'next': {'title': 'Angin', 'prev': {...}, 'next': None}}
9	tempSongList = {'title': 'Satu', 'prev': {'title': 'Kirana', 'prev': None, 'next': {...}}, 'next': {'title': 'Angin', 'prev': {...}, 'next': None}}
7	while {'title': 'Satu', 'prev': {'title': 'Kirana', 'prev': None, 'next': {...}}, 'next': {'title': 'Angin', 'prev': {...}, 'next': None}} != None: # True
8	print('Satu') # tempSongList['prev'] = {'title': 'Kirana', 'prev': None, 'next': {'title': 'Satu', 'prev': {...}, 'next': {'title': 'Angin', 'prev': {...}, 'next': None}}}
9	tempSongList = {'title': 'Kirana', 'prev': None, 'next': {'title': 'Satu', 'prev': {...}, 'next': {'title': 'Angin', 'prev': {...}, 'next': None}}}
7	while {'title': 'Kirana', 'prev': None, 'next': {'title': 'Satu', 'prev': {...}, 'next': {'title': 'Angin', 'prev': {...}, 'next': None}}} != None: # True
8	print('Kirana') # tempSongList['prev'] = None
9	tempSongList = None
7	while None != None: # False

Contoh output: Angin Satu Kirana

Studi Kasus Aplikasi Pemutar Lagu

Latihan

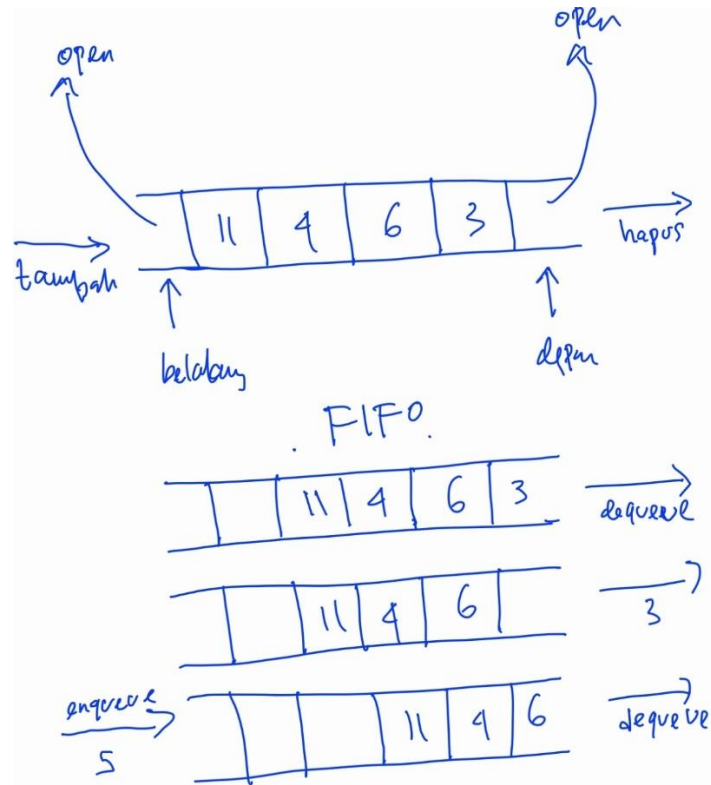
Bibliografi

Penerapan *linked list* sangatlah luas, di antaranya yaitu untuk mempercepat algoritma FP-Growth (Zhenguo et al., 2009), mekanisme *locked-free* (Fomitchev & Ruppert, 2004) untuk berbagi data pada sistem terdistribusi. (Yang et al., 2010) menerapkan *concurrent linked-list* pada prosesor grafis modern yang bermanfaat untuk membuat efek rendering yang kompleks secara *real-time*. Pengurangan *latency* pengaksesan memori (Yamamura et al., 2002).

Antrian (Queue)

Capaian Pembelajaran

Antrian adalah salah satu struktur data abstrak.



Ciri utama antrian adalah:

- Kedua ujung antrian bersifat terbuka
- Bagian belakang merupakan tempat menambah data atau data yang ditambahkan terakhir
- Bagian depan tempat data yang akan segera dihapus atau data yang masuk pertama kali
-

Operasi penting pada antrian yaitu

1. Enqueue atau tambah antrian
2. Dequeue atau hapus antrian
3. Peek atau mengambil data paling depan tanpa dequeue
4. isFull atau antrian penuh
5. isEmpty atau antrian kosong

Antrian menggunakan *array*

Menambah antrian (*enqueue*)

```
1. fungsi enqueue(queue, queueMaxCapacity, newData):
2.     frontIndex = queueMaxCapacity - 1
3.     rearIndex = 0
4.
5.     if queue[frontIndex] == None:
6.         queue[frontIndex] = newData
7.         return queue
8.
9.     if queue[rearIndex] != None:
10.        print 'antrian penuh'
11.        return queue
12.
13.    for (i = queueMaxCapacity-2; i > -1; i--):
14.        if queue[i] == None:
15.            queue[i] = newData
16.            return queue
17.
18. queueMaxCapacity = 4
19. queue = [None, None, None, None]
20.
21. queue = enqueue(queue, queueMaxCapacity, 5)
22. print(queue)
23. queue = enqueue(queue, queueMaxCapacity, 3)
24. print(queue)
25. queue = enqueue(queue, queueMaxCapacity, 9)
26. print(queue)
27. queue = enqueue(queue, queueMaxCapacity, 2)
28. print(queue)
29.
30. newData = 12
31. queue = enqueue(queue, queueMaxCapacity, newData)
32. print(queue)
```

Eksekusi

Baris	Eksekusi
18	queueMaxCapacity = 4
19	queue = [None, None, None, None]
21	queue = enqueue([None, None, None, None], 4, 5)
1	enqueue([None, None, None, None], 4, 5)
2	frontIndex = 3
3	rearIndex = 0 #queue[3] = None
5	if None == None:
6	queue[3] = 5 #queue = [None, None, None, 5]
7	return [None, None, None, 5]
21	queue = [None, None, None, 5]
22	None, None, None, 5
23	queue = enqueue([None, None, None, 5], 4, 3)
1	enqueue([None, None, None, 5], 4, 3)
2	frontIndex = 3 #queue[3] = 5
3	rearIndex = 0 #queue[0] = None
5	if 5 == None #False

```

9         if None != None:         #False
12        for (i=2; 2 > -1; 2--) #True #queue[2] = None
13            if None == None      #True
14                queue[2] = 3      # queue = [None, None, 3, 5]
15                return [None, None, 3, 5]
23    queue = [None, None, 3, 5]
24    print None, None, 3, 5

25    queue = enqueue([None, None, 3, 5], 4, 9)
1    enqueue([None, None, 3, 5], 4, 9)
2        frontIndex = 3            #queue[3] = 5
3        rearIndex = 0             #queue[0] = None
5        if 5 == None              #False
9        if None != None          #False
12       for (i=2; 2 > -1; 2--)      #True #queue[2] = 3
13           if 3 == None:          #False
12       for (i=1; 1 > -1; 1--)      #True #queue[1] = None
13           if None == None:      #True
14               queue[1] = 9       #queue = [None, 9, 3, 5]
15               return [None, 9, 3, 5]
25    queue = [None, 9, 3, 5]
26    print None, 9, 3, 5

27    queue = enqueue([None, 9, 3, 5], 4, 2)
1    enqueue([None, 9, 3, 5], 4, 2)
2        frontIndex = 3            #queue[3] = 5
3        rearIndex = 0             #queue[0] = None
5        if 5 == None:            #False
9        if None != None:         #False
12       for (i=2; 2 > -1; 2--)      #True #queue[2] = 3
13           if 3 == None:          #False
12       for (i=1; 1 > -1; 1--)      #True #queue[1] = 9
13           if 9 == None:          #False
12       for (i=0; 0 > -1; 0--)      #True #queue[0] = None
13           if None == None       #True
14               queue[0] = 2       # queue = [2, 9, 3, 5]
15               return [2, 9, 3, 5]
27    queue = [2, 9, 3, 5]
28    print 2, 9, 3, 5

30    newData = 12
31    queue = enqueue([2, 9, 3, 5], 4, 12)
1    enqueue([2, 9, 3, 5], 4, 12)
2        frontIndex = 3            #queue[3] = 5
3        rearIndex = 0             #queue[0] = 2
5        if 5 == None:            #False
9        if 2 != None:            #True
10            print 'antrian penuh'
11            return [2, 9, 3, 5]
31    queue = [2, 9, 3, 5]
32    print 2, 9 3, 5

```


Menghapus antrian (*dequeue*)

```

1. def queueIsEmpty(frontIndex, queue):
2.     return queue[frontIndex] == None
3.
4. def dequeue(queue, queueMaxCapacity):
5.     frontIndex = -1
6.     tempQueue = queue
7.     queue = [None] * queueMaxCapacity
8.
9.     if queueIsEmpty(frontIndex, tempQueue):
10.        return tempQueue
11.
12.    for i in range(queueMaxCapacity-2, -1, -1):
13.        queue[i+1] = tempQueue[i]
14.    return queue
15.
16. queueMaxCapacity = 4
17. newData = 12
18.
19. queue = dequeue(queue, queueMaxCapacity)
20. print(queue)

```

Eksekusi

Queue saat ini: queue = [2, 9, 3, 5]

16	queueMaxCapacity = 4
17	newData = 12
19	queue = dequeue([2, 9, 3, 5], 4)
4	def dequeue([2, 9, 3, 5], 4)
5	frontIndex = -1
6	tempQueue = [2, 9, 3, 5]
7	queue = [None, None, None, None]
9	if queueIsEmpty(-1, [2, 9, 3, 5])
1	queueIsEmpty(-1, [2, 9, 3, 5])
	#queue[-1] = 5
2	return 5 == None #False
9	if false:
	#tempQueue =
12	for 2 in range(2, -1, -1) #True
13	queue[3] = 3
	#queue = [None, None, None, 3]
12	For 1 in range(2, -1, -1) #True
13	queue[2] = 9
	#queue = [None, None, 9, 3]
12	For 0 in range(2, -1, -1) #True
13	Queue[1] = 2
	#queue = [None, 2, 9, 3]
12	for -1 in range(2, -1, -1) #False
14	return [None, 2, 9, 3]
19	Queue = [None, 2, 9, 3]
20	cetak {None, 2, 9, 3}

Untuk *dequeue* sama dengan materi menghapus elemen *array*. Silakan dibaca kembali subbab xx. Perbedaannya adalah jika pada Subbab xx tersebut, setiap kali menghapus elemen, ukuran *array* langsung berkurang. Sedangkan pada *dequeue*, elemen yang dihapus tidak mengurangi ukuran *array*. Sehingga sel tempat elemen yang dikosongkan tersebut diganti dengan **None** atau **Null**.

Antrian menggunakan *linked list*

Pada prinsipnya sama dengan *linked list* pada umumnya. Perbedaannya terletak pada penambahan kapasitas antrian yang perlu didefinisikan di awal.

Operasi yang dibahas pada materi kali ini adalah *dequeue*. Pada antrian berbentuk *linked list*, *dequeue* berarti menghapus sebuah *node* yang terletak di ekor. Itulah sebabnya mengapa pada bab Singly Linked List, penulis tidak membahas penghapusan *node* di ekor. Karena memang akan dibahas pada materi *dequeue* antrian berupa *linked list*.

```

1. def dequeue(queue):
2.
3.     if queue is None or queue['next'] is None:
4.         return 'Queue is empty.'
5.
6.     tempQueue = queue
7.
8.     while tempQueue['next']['next'] is not None:
9.         tempQueue = tempQueue['next']
10.
11.    tempQueue['next'] = None
12.    return queue
13.
14. queue = {
15.    'data': 10, 'next': {'data': 5, 'next': {'data': 19, 'next': None}}
16. }
17.
18. queue = dequeue(queue)
19. print(queue)
20. queue = dequeue(queue)
21. print(queue)
22. queue = dequeue(queue)
23. print(queue)

```

Eksekusi

14	queue = {'data': 10, 'next': {'data': 5, 'next': {'data': 19, 'next': None}}}
18	queue = dequeue({'data': 10, 'next': {'data': 5, 'next': {'data': 19, 'next': None}}})
1	def queue({'data': 10, 'next': {'data': 5, 'next': {'data': 19, 'next': None}}}): # queue['next'] = {'data': 5, 'next': {'data': 19, 'next': None}}
3	if {'data': 10, 'next': {'data': 5, 'next': {'data': 19, 'next': None}}} is None or {'data': 5, 'next': {'data': 19, 'next': None}} is None #False
6	tempQueue = {'data': 10, 'next': {'data': 5, 'next': {'data': 19, 'next': None}}} #tempQueue['next'] = {'data': 5, 'next': {'data': 19, 'next': None}}

	<code>#tempQueue['next']['next'] = {'data': 19, 'next': None}</code>
8	<code>while {'data': 19, 'next': None} is not None: #True</code>
9	<code>tempQueue = {'data': 5, 'next': {'data': 19, 'next': None}}</code> <code>#tempQueue['next']['next'] = None</code>
8	<code>while None is not None: #False</code> <code>#tempQueue['next'] = {'data': 19, 'next': None}</code>
11	<code>tempQueue['next'] = None</code> <code>#tempQueue = {'data': 10, 'next': {'data': 5, 'next': None}}</code>
12	<code>return {'data': 10, 'next': {'data': 5, 'next': None}}</code>
	LANJUTKAN...

Konsep antrian yang kita bahas di subbab ini merupakan antrian biasa. Artinya antrian tersebut murni menerapkan konsep *first in first out*. Namun, pada situasi tertentu antrian biasa seperti ini tidaklah cukup. Misalnya, ada suatu *node* yang memiliki urgensi yang tinggi sehingga FIFO tidak berlaku. Oleh karena itu digunakanlah antrian berprioritas atau dikenal sebagai *priority queue*. Khusus mengenai antrian berprioritas ini akan dibahas pada Bab xx mengenai struktur data *heap*. Jika pembaca tertarik, langsung saja loncat ke bab tersebut.

Latihan

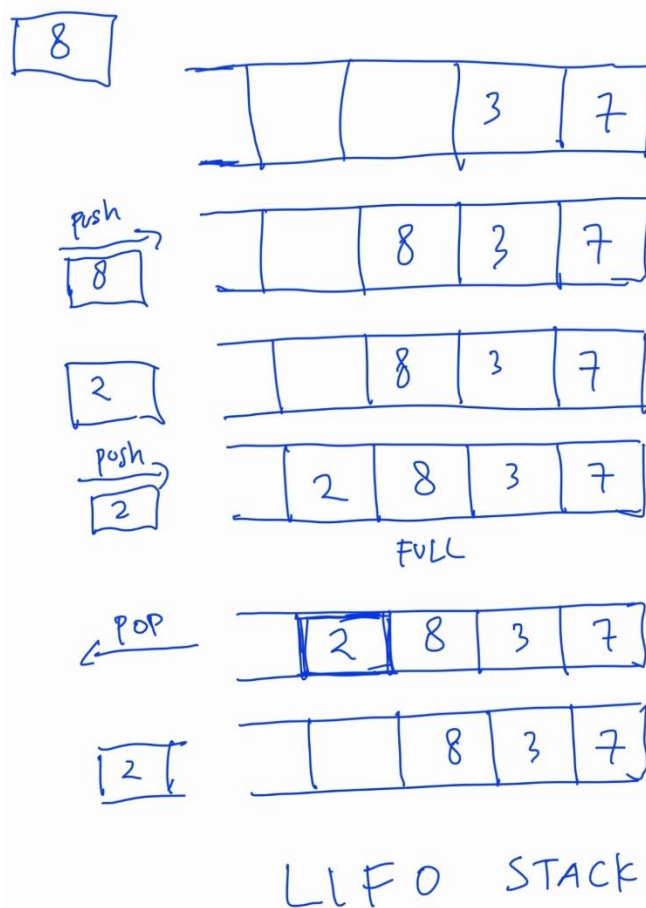
Tumpukan (Stack)

Stack adalah salah satu struktur data yang menggunakan prinsip *last in first out* atau LIFO. Artinya, elemen terakhir yang masuk ke tumpukan adalah elemen yang duluan keluar. Sebaliknya, elemen pertama yang masuk ke tumpukan merupakan elemen yang keluar terakhir.

Prinsip *stack* adalah hanya memiliki satu bagian yang terbuka, yaitu bagian atas (jika vertikal), atau kepala (jika horizontal).

Operasi *stack*

1. menambah elemen baru yaitu *push*
2. mengambil elemen paling atas yaitu *pop*
3. membaca elemen paling atas tanpa menghapus/mengambil yaitu *peek*



Stack representasi array

Menambah elemen (*push*)

1. fungsi `pushStack(stack, stackMaxCapacity, newData):`
2. `bottomIndex = -1`
3. `topIndex = 0`
- 4.
5. #jika stack kosong

```

6.     if stack[bottomIndex] == None:
7.         stack[bottomIndex] = newData
8.         return stack
9.
10.    for (i=stackMaxCapacity-1; i > -1; i--):
11.        #jika stack penuh
12.        if stack[topIndex] != None:
13.            cetak ('Stack sedang penuh')
14.
15.        if stack[i] == None:
16.            stack[i] = newData
17.            return stack
18.
19. stackMaxCapacity = 4
20. stack = [None, None, None, None]
21.
22. newData = 6
23. stack = pushStack(stack, stackMaxCapacity, newData)
24. print(stack)
25. newData = 3
26. stack = pushStack(stack, stackMaxCapacity, newData)
27. print(stack)
28. newData = 11
29. stack = pushStack(stack, stackMaxCapacity, newData)
30. print(stack)

```

Menghapus elemen (*pop*)

```

1.  fungsi popStack(stack):
2.      bottomIndex = -1
3.      topIndex = 0
4.
5.      for (i=0, i < stackMaxCapacity, i++)
6.          if stack[bottomIndex] == None:
7.              cetak ('Stack sedang kosong')
8.              break
9.
10.         if stack[i] != None:
11.             stack[i] = None
12.             return stack
13.
14. stack = popStack(stack)
15. print(stack)
16. stack = popStack(stack)
17. print(stack)

```

Stack representasi *linked list*

Latihan

1. Diketahui terdapat n data yang akan di-*push* ke *stack* [None, None, 4, 2, 12].
 - a. Buatlah fungsi yang merepresentasikan *stack* menggunakan *array*
 - b. Buatlah fungsi yang merepresentasikan *stack* dalam *linked list*
 - c. Buatlah fungsi untuk memeriksa apakah n data bisa di-*push* atau tidak ke *stack*. Contoh: $n = 2$. Outputnya: Data bisa di-*push* ke *stack*. Contoh $n = 3$. Output: Data tidak bisa di-*push* ke *stack*

Heap

Antrian Berprioritas

Seperti yang sudah disinggung pada Bab xx mengenai antrian, antrian berprioritas adalah salah satu varian antrian yang khusus dibuat untuk menangani *node* yang memiliki prioritas tertinggi terlebih dahulu. Dengan kata lain, jika pada antrian biasa dikenal dengan FIFO, maka pada antrian berprioritas ini dikenal dengan Highest In First Out atau HIFO.

Mengeimplementasikan antrian berprioritas bisa menggunakan struktur data *array*, *linked list*, *heap*, dan *binary search tree*. Namun, berdasarkan (Deo & Prasad, 1992), *heap* adalah struktur data yang paling efisien untuk menerapkan antrian berprioritas.

(sertakan perbandingan Big O masing-masing)

Latihan

Tree

Tree adalah salah satu jenis struktur data yang pemakaiannya sangat populer selain *linked list*. Prinsip-prinsip utama *tree*:

Penambahan dan pembuatan *node*

1. Tiap *node* terdiri dari tiga segmen yaitu *left*, *data* dan *right*. *Left* berarti penunjuk ke *node* kiri, *data* berisi nilai atau data yang disimpan, dan *right* penunjuk ke *node* kanan
2. Simpul yang penunjuk *left* dan *right*-nya tidak menunjuk ke simpul lain, disebut sebagai simpul daun (*leaf*) atau juga disebut simpul akhir.
3. Sebuah *node*, setiap kali dibuat secara *default* tersusun atas: {'left':None, 'data':data, 'right':None}
4. Aturan penambahan *node* pada *tree*:
 - a. Jika *tree* masih kosong, maka *node* baru otomatis mengikuti *node default*
 - b. Jika *tree* tidak kosong, maka bandingkan antara data pada *node* baru dengan data pada *node root*
 - i. Jika data *node* baru lebih kecil dari *data* pada *root node*, maka isi penunjuk *left* pada *root node* dengan *node* baru
 - ii. Jika data *node* baru lebih besar dari *data* pada *root node*, maka isi penunjuk *right* pada *root node* dengan *node* baru

```
1. fungsi insert(tree, data):
2.     if tree is None:
3.         tree = {'left':None, 'data':data, 'right':None}
4.     else:
5.         if data < tree["data"]:
6.             if tree["left"] is None:
7.                 tree["left"] = create_node(data)
8.             else:
9.                 insert(tree["left"], data)
10.        else:
11.            if tree["right"] is None:
12.                tree["right"] = create_node(data)
13.            else:
14.                insert(tree["right"], data)
15.    return tree
16.
17. tree = None
18. tree = insert(tree, 5)
19. tree = insert(tree, 6)
20. tree = insert(tree, 3)
21. tree = insert(tree, 8)
22. tree = insert(tree, 9)
```

Baris	Tahapan Eksekusi
-------	------------------

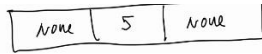
17	tree = None
----	-------------




```

18 tree = insert(None, 5)
1   fungsi insert(None, 5)
2       if None is None:      #True
3           tree = {None, 5, None}
4       else: #False
15           return {None, 5, None}
18 tree = {None, 5, None}

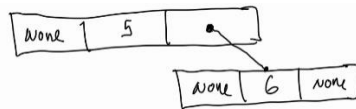
```



```

19 tree = insert({None, 5, None}, 6)
1   fungsi insert({None, 5, None}, 6)
2       if {None, 5, None} is None:  #False
4       else: #True
           #tree['data'] = 5
5           if 6 < 5: #False
10          else:      #True
               #tree['right'] = None
11              if None is None: #True
12                  tree['right'] = {None, 6, None}
               #tree = {None, 5, {None, 6, None}}
13          else: #False
15              return {None, 5, {None, 6, None}}
19 tree = {None, 5, {None, 6, None}}

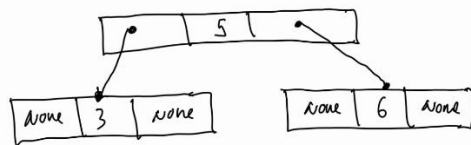
```



```

20 tree = insert({None, 5, {None, 6, None}}, 3)
1   fungsi insert({None, 5, {None, 6, None}}, 3)
2       if {None, 5, {None, 6, None}} is None: #False
4       else: #True
           #tree['data'] = 5
5           if 3 < 5: #True
               #tree['left'] = None
6               if None is None: #True
7                   tree['left'] = {None, 3, None}
               #tree = {{None, 3, None}, 5, {None, 6, None}}
8           else: #False
10          else:      #False
15              return {{None, 3, None}, 5, {None, 6, None}}
20 tree = {{None, 3, None}, 5, {None, 6, None}}

```



```

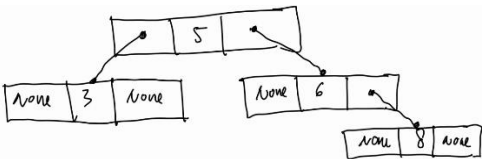
21 tree = insert({{None, 3, None}, 5, {None, 6, None}}, 8)
1   fungsi insert({{None, 3, None}, 5, {None, 6, None}}, 8)
2       If {{None, 3, None}, 5, {None, 6, None}} is None: #False
4       Else: #True
           #tree['data'] = 5
5           if 8 < 5: #False

```

```

10         Else: #True
            #tree['right'] = {None, 6, None}
11         if {None, 6, None} is None: #False
12         Else: #True
13             insert({None, 6, None}, 8)
1         fungsi insert({None, 6, None}, 8)
2         if {None, 6, None} is None: #False
4         Else: #True
            #tree['data'] = 6
5            if 8 < 6: #False
10           Else: #True
                #tree['right'] = None
11                if None is None: #True
12                #tree['right'] = {None, 8, None}
                    #tree['right'] = {None, 6, {None, 8, None}}
15            return {{None, 3, None}, 5, {None, 6, {None, 8, None}}}
21 tree = {{None, 3, None}, 5, {None, 6, {None, 8, None}}}

```



```

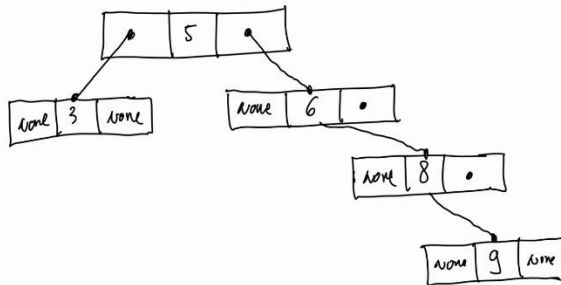
22 tree = insert({{None, 3, None}, 5, {None, 6, {None, 8, None}}}, 9)
1  fungsi insert({{None, 3, None}, 5, {None, 6, {None, 8, None}}}, 9)
2  if {{None, 3, None}, 5, {None, 6, {None, 8, None}}} is None: #False
4  Else: #True
        #tree['data'] = 5
5        if 9 < 5: #False
10       Else: #True
            #tree['right'] = {None, 6, {None, 8, None}}
11            if {None, 6, {None, 8, None}} is None: #False
12            Else: #True
13                insert({None, 6, {None, 8, None}}, 9)
1         Fungsi insert({None, 6, {None, 8, None}}, 9)
2         if {None, 6, {None, 8, None}} is None: #False
4         Else: #True
            #tree['data'] = 6
5            if 9 < 6: #False
10           Else: #True
                #tree['right'] = {None, 8, None}
11                if {None, 8, None} is None: #False
12                Else: #True
13                    insert({None, 8, None}, 9)
1         Fungsi insert({None, 8, None}, 9)
2         if insert({None, 8, None} is None: #False
4         Else: #True
            #tree['data'] = 8
5            if 9 < 8: #False
10           Else: #True
                #tree['right'] = None
11                if None is None: #True
12                tree['right'] = {None, 9, None}

```

```

#tree['right'] = {None, 8, {None, 9, None}}
#tree['right'] = {None, 6, {None, 8, {None, 9, None}}}
15         return {{None, 3, None}, 5, {None, 6, {None, 8, {None, 9, None}}}}
22     tree = {{None, 3, None}, 5, {None, 6, {None, 8, {None, 9, None}}}}

```



Traverse

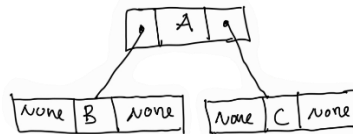
Traverse digunakan untuk menelusuri atau menjelajahi *node* pada *tree*. Kegunaannya adalah untuk mencetak atau mengambil data pada *node*.

Terdapat beberapa teknik untuk menjelajahi *node* pada *tree*.

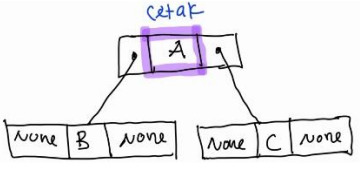
1. Preorder traversal

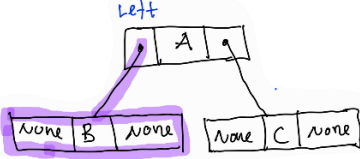
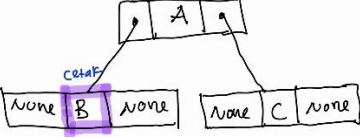


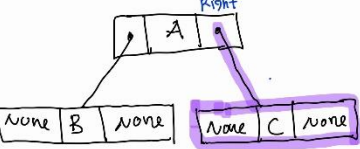
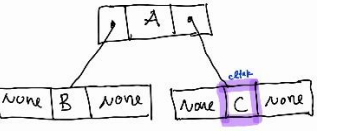
Teknik ini bekerja dengan cara menelusuri *root node*, lalu ke *node* kiri, dan berakhir ke *node* kanan

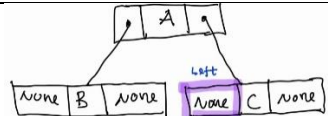
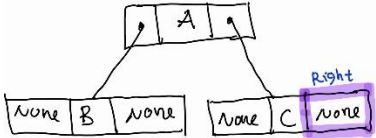
Misal: tree = {{None, B, None}, A, {None, C, None}}



1. fungsi poTraversing(tree):
2. if tree is None:
3. return None
4. print tree["data"]
5. poTraversing(tree["left"])
6. poTraversing(tree["right"])

1	poTraversing({{None, B, None}, A, {None, C, None}})
	#stack: poTraversing(A)
2	if {{None, B, None}, A, {None, C, None}} is None: #False
4	<div> print A  </div> # tree["left"] = {None, B, None}

	
5	<code>poTraversing({None, B, None})</code>
	<code>#stack: poTraversing(A), poTraversing(B)</code>
2	<code>if ({None, B, None}) is None: #False</code>
4	<p><code>print B</code></p>  <p><code># tree["left"] = None</code></p> 
5	<code>poTraversing(None)</code>
	<code>#stack: poTraversing(A), poTraversing(B), poTraversing(None)</code>
2	<code>if None is None: #True</code>
3	<p><code>return None</code></p> <p><code># tree["right"] = None</code></p> 
	<code>#stack: poTraversing(A), poTraversing(B)</code>
6	<code>poTraversing(None)</code>
	<code>#stack: poTraversing(A), poTraversing(B), poTraversing(None)</code>
2	<code>if None is None: #True</code>
3	<code>return None</code>
	<code>#stack: poTraversing(A), poTraversing(B)</code>
	<code>#stack: poTraversing(A)</code>
	<code># tree["right"] = {None, C, None}</code>
	
6	<code>poTraversing({None, C, None})</code>
	<code>#stack: poTraversing(A), poTraversing(C)</code>
1	<code>if {None, C, None} is None: #False</code>
4	<p><code>print C</code></p>  <p><code># tree["left"] = None</code></p>

	
5	poTraversing(None)
	#stack: poTraversing(A), poTraversing(C), poTraversing(None)
2	if None is None: #True
3	return None
	#stack: poTraversing(A), poTraversing(C)
	# tree["right"] = None
	
6	poTraversing(None)
	#stack: poTraversing(A), poTraversing(C), poTraversing(None)
2	if None is None: #True
3	return None
	#stack: poTraversing(A), poTraversing(C)
	#stack: poTraversing(A)
	#stack:

2. In-order traversal

Teknik ini bekerja dengan cara menelusuri *node* kiri terlebih dahulu, lalu *node* tengah, terakhir *node* kanan.

Misalnya kita hendak mencetak seluruh data pada *node* di dalam *tree*

```
tree = {{None, 3, None}, 5, {None, 6, {None, 8, {None, 9, None}}}}
```

1.	fungsi inorder_traversal(tree):
2.	if tree is None:
3.	return None
4.	inorder_traversal(tree["left"])
5.	print(tree["data"], end=' ')
6.	inorder_traversal(tree["right"])

Stack	[iot(5)]
1	iot({None, 3, None}, 5, {None, 6, {None, 8, {None, 9, None}}}):
2.	if {{None, 3, None}, 5, {None, 6, {None, 8, {None, 9, None}}}} is None: #False
4	iot({None, 3, None}):
Stack	[iot(5), iot(3)]
2	If if {None, 3, None} is None: #False
4	iot(None)
Stack	[iot(5), iot(3), iot(None)]
2	if None is None: #True
3	return None
Stack	[iot(5), iot(3)]
5	Print(3)
6	Iot(None)
stack	[iot(5), iot(3), iot(None)]

Binary Tree

Graf

Trie

Tabel Hash

Referensi

- Deo, N., & Prasad, S. (1992). Parallel heap: An optimal parallel priority queue. *The Journal of Supercomputing*, 6(1), 87–98. <https://doi.org/10.1007/BF00128644>
- Fomitchev, M., & Ruppert, E. (2004). Lock-free linked lists and skip lists. *Proceedings of the Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing*, 23, 50–59. <https://doi.org/10.1145/1011767.1011776>
- Yamamura, S., Kadota, T., Hirata, H., Niimi, H., & Shibayama, K. (2002). Evaluation of a data preload mechanism for a linked list structure. *Systems and Computers in Japan*, 33(3), 21–30. <https://doi.org/10.1002/scj.1110>
- Yang, J. C., Hensley, J., Grün, H., & Thibieroz, N. (2010). Real-time concurrent linked list construction on the GPU. *Computer Graphics Forum*, 29(4), 1297–1304. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2010.01725.x>
- Zhenguo, D., Qinqin, W., & Xianhua, D. (2009). An improved FP-growth algorithm based on compound single linked list. *2009 2nd International Conference on Information and Computing Science, ICIC 2009*, 1(1), 351–353. <https://doi.org/10.1109/ICIC.2009.96>