Bahan kuliah IF4020 Kriptografi

02 - Kriptografi Klasik
(Bagian 1)

Oleh: Rinaldi Munir

Program Studi Teknik Informatika
Sekolah Teknik Elektro dan Informatika
Institut Teknologi Bandung
2023

Pendahuluan

- Kriptografi klasik merupakan kriptografi yang sudah tua, sudah ada sejak ribuan tahun yang lalu sampai dtemukan computer digital
- Cipher klasik (*classical cipher*) hanya memproses pesan berbasis huruf alfabet
- Menggunakan alat tulis pena dan kertas saja
- Termasuk ke dalam jenis kriptografi kunci-simetri

- Tiga alasan mempelajari kriptografi klasik:
  1. Memahami konsep dasar kriptografi.
  2. Sebagai dasar algoritma kriptografi modern.
  3. Untuk memahami kelemahan sistem *cipher*.

- *Cipher* di dalam kriptografi klasik disusun oleh dua teknik dasar:
  1. **Teknik substitusi**: mengganti huruf plainteks dengan huruf cipherteks.

Plainteks:	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
Cipherteks:	I	J	K	L	Q	R	S	T	U	V	W	D	C	B	A	Z	Y	X	P	O	N	M	H	G	F	E

Contoh: Plainteks: `MENGANTUK`

Cipherteks: `CQBSIBONW`

  2. **Teknik transposisi**: mengubah susunan atau posisi huruf plainteks menjadi susunan huruf cipherteks.

Disebut juga teknik *scrambling*, permutasi, atau pengacakan

Contoh: Plainteks: `MENGANTUK`

Cipherteks: `TNEAKMNGU`

- Oleh karena itu, dikenal dua macam *cipher* di dalam kriptografi klasik:

  1. *Cipher* Substitusi (*substitution Cipher*)

     - metode enkripsi dan dekripsi menggunakan teknik substitusi

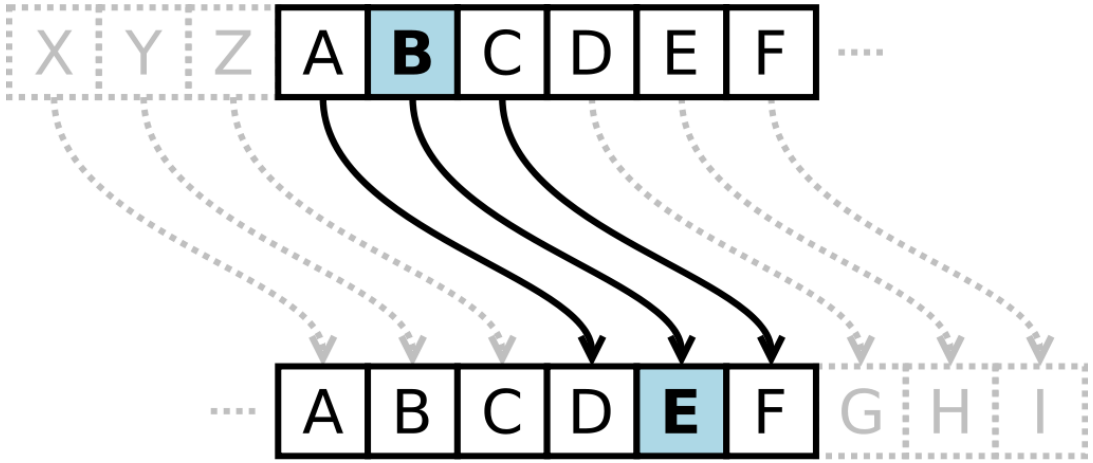
  2. *Cipher* Transposisi (*transposition Cipher*)

     - metode enkripsi dan dekripsi menggunakan teknik transposisi

- Kombinasi kedua teknik tersebut membentuk *product cipher* atau *super enkripsi*

  product cipher = cipher substitusi + cipher transposisi

Cipher Substitusi



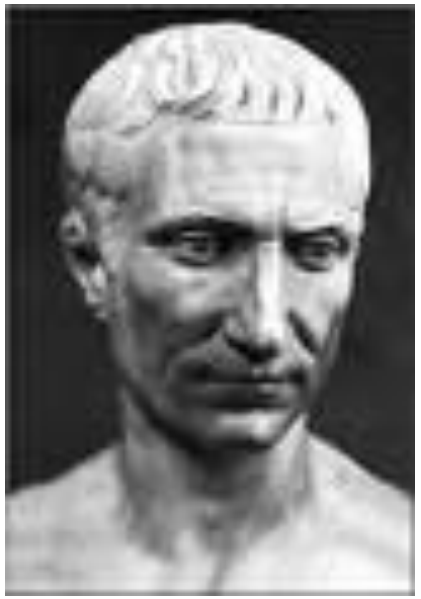
- Contoh yang terkenal: *Caesar Cipher*
- Tiap huruf alfabet digeser 3 huruf ke kanan

```
Plainteks :  A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z
Cipherteks : D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z A B C
```

- Contoh:

Plainteks: `awasi asterix dan temannya obelix`

Cipherteks: `DZDVL DVWHULA GDQ WHPDQQBA REHOLA`



- Supaya lebih aman, cipherteks dikelompokkan ke dalam kelompok n-huruf, misalnya kelompok 4-huruf:

  Semula: `DZDVL DVWHULA GDQ WHPDQQBA REHOLA`

  Menjadi: `DZDV LDVW HULA GDQW HPDQ QBAR EHOL A`

- Atau membuang semua spasi:

  `DZDVLDVWHULAGDQWHPDQQBAREHOLA`

- Tujuannya agar proses kriptanalisis menjadi lebih sulit dilakukan

Caesar wheel untuk membentuk tabel substitusi huruf alfabet

- Misalkan setiap huruf alfabet dikodekan ke dalam integer dari 0 sampai 25 sebagai berikut:

A = 0,
B = 1,
C = 2,
...
Z = 25

maka, secara matematis Caesar Cipher dirumuskan sebagai:

Enkripsi: $c = E(p) = (p + 3) \bmod 26$

Dekripsi: $p = D(c) = (c - 3) \bmod 26$

Ket: p = plainteks; c = cipherteks

ENKRIPSI:

Plainteks: `awasi asterix dan temannya obelix`

- p_1 = ‘a’ = 0 → c_1 = $E(0)$ = (0 + 3) **mod** 26 = 3 = ‘D’
- p_2 = ‘w’ = 22 → c_2 = $E(22)$ = (22 + 3) **mod** 26 = 25 = ‘Z’
- p_3 = ‘a’ = 0 → c_3 = $E(0)$ = (0 + 3) **mod** 26 = 3 = ‘D’
- p_4 = ‘s’ = 18 → c_4 = $E(18)$ = (18 + 3) **mod** 26 = 21 = ‘V’
- p_5 = ‘i’ = 8 → c_4 = $E(8)$ = (8 + 3) **mod** 26 = 11 = ‘L’
- dst…

Cipherteks: `DZDVL DVWHULA GDQ WHPDQQBA REHOLA`

DEKRIPSI:

Cipherteks: `DZDVL DVWHULA GDQ WHPDQQBA REHOLA`

- c_1 = 'D' = 3 → $p_1 = D(3) = (3 - 3)$ **mod** 26 = 0 = '`a`'
- c_2 = 'Z' = 25 → $p_2 = D(25) = (25 - 3)$ **mod** 26 = 22 = '`w`'
- c_3 = 'D' = 3 → $p_3 = D(3) = (3 - 3)$ **mod** 26 = 0 = '`a`'
- ...
- c_{12} = 'A' = 0 → $p_{12} = D(0) = (0 - 3)$ **mod** 26 = –3 **mod** 26 = 23 = '`x`'

  Keterangan: – 3 **mod** 26 dihitung dengan cara berikut:

  |– 3| **mod** 26 = 3, lalu 26 – 3 = 23

  atau dengan cara: (26 + 0 – 3) mod 26 = 23 mod 26 = 23

- Plainteks ditemukan kembali: `awasi asterix dan temannya obelix`

- Jika pergeseran huruf sejauh k, maka:

  Enkripsi: $c = E(p) = (p + k) \bmod 26$
  Dekripsi: $p = D(c) = (c - k) \bmod 26$
  k = kunci rahasia

- Untuk 256 karakter ASCII, maka:

  Enkripsi: $c = E(p) = (p + k) \bmod 256$
  Dekripsi: $p = D(c_i) = (c - k) \bmod 256$
  k = kunci rahasia

Kripatanalisis Caesar Cipher

- *Caesar cipher* mudah dipecahkan dengan *exhaustive key search (brute force)* karena jumlah kuncinya sangat sedikit (hanya ada 26 kunci).

- Coba lakukan dekripsi dengan berbagai nilai k dari 0 sampai 25, lalu periksa apakah hasil dekripsi merupakan kata atau kalimat yang bermakna. Jika ya, maka diduga k adalah kuncinya.

- Untuk memastikan k adalah kunci yang benar, maka cobakan k untuk potongan kriptogram lainnya.

Contoh: kriptogram XMZVH

Tabel 1. Contoh *exhaustive key search* terhadap cipherteks XMZVH

Kunci (*k*) *ciphering*	'Pesan' hasil dekripsi	Kunci (*k*) *ciphering*	'Pesan' hasil dekripsi	Kunci (*k*) *ciphering*	'Pesan' hasil dekripsi
0	**XMZVH**	17	**GVIEQ**	8	**PERNZ**
25	**YNAWI**	16	**HWJFR**	7	**QFSOA**
24	**ZOBXJ**	15	**IXKGS**	6	**RGTPB**
23	**APCYK**	14	**JYLHT**	5	**SHUQC**
22	**BQDZL**	13	**KZMIU**	4	**TIVRD**
21	**CREAM**	12	**LANJV**	3	**UJWSE**
20	**DSFBN**	11	**MBOKW**	2	**VKXTF**
19	**ETGCO**	10	**NCPLX**	1	**WLYUG**
18	**FUHDP**	9	**ODQMY**		

Plainteks yang potensial adalah CREAM dengan $k = 21$.
Kunci ini digunakan untuk mendekripsikan potongan cipherteks lainnya.

Contoh lain:

Cipherteks: PHHW PH DIWHU WKH WRJD SDUWB

k	PHHW PH DIWHU WKH WRJD SDUWB
0	phhw ph diwhu wkh wrjd sduwb
1	oggv og chvgt vjg vqic rctva
2	nffu nf bgufs uif uphb qbsuz
3	**meet me after the toga party**
4	ldds ld zesdq sgd snfz ozqsx
5	kccr kc ydrcp rfc rmey nyprw
6	…
21	ummb um inbmz bpm bwoi xizbg
22	tlla tl hmaly aol avnh whyaf
23	skkz sk glzkx znk zumg vgxze
24	rjjy rj fkyjw ymj ytlf ufwyd
25	qiix qi ejxiv xli xske tevxc

(Sumber: William Stallings)

Cipherteks: VIVBQ SQBI SMBMUC LQ ICTI

k	Hasil dekripsi
0	vivbq sqbi smbmuc lq icti
1	uhuap rpah rlaltb kp hbsh
2	tgtzo qozg qkzksa jo garg
3	sfsyn pnyf pjyjrz in fzqf
4	rerxm omxe oixiqy hm eype
5	qdqwl nlwd nhwhpx gl dxod
6	pcpuk mkvc mgvgow fk cwnc
7	obouj ljub lfufnu ej bvmb
8	**nanti kita ketemu di aula**
9	mzmsh jhsz jdsdlt ch ztkz
10	lylrg igry icrcks bg ysjy
11	kxkqf hfqx hbqbjr af xrix
12	jwjpe gepw gapaiq ze wqhw
13	iviod fdov fzozhp yd vpgv
14	huhnc ecnu eynygo xc uofu
15	gtgmb dbmt dxmxfn wb tnet
16	fsfla cals cwlwem va smds
17	erekz bzkr bvkvdl uz rlcr
18	dqdjy ayjq aujuck ty qkbq
19	cpcix zxip ztitbj sx pjap
20	bobhw ywho yshsai rw oizo
21	anagv xvgn xrfqyg pu mgxm
22	xmzfu wufm wqfqyg pu mgxm
23	ylyet vtel vpepxf ot lfwl
24	xkxds usdk uodowe ns kevk
25	wjwcr trcj tncnvd mr jduj

- Bagaimana jika terdapat dua atau lebih nilai k yang menghasilkan pesan-pesan bermakna?

Contoh: Misalkan kriptogram `HSPPW` menghasilkan dua kemungkinan kunci yang potensial, yaitu:

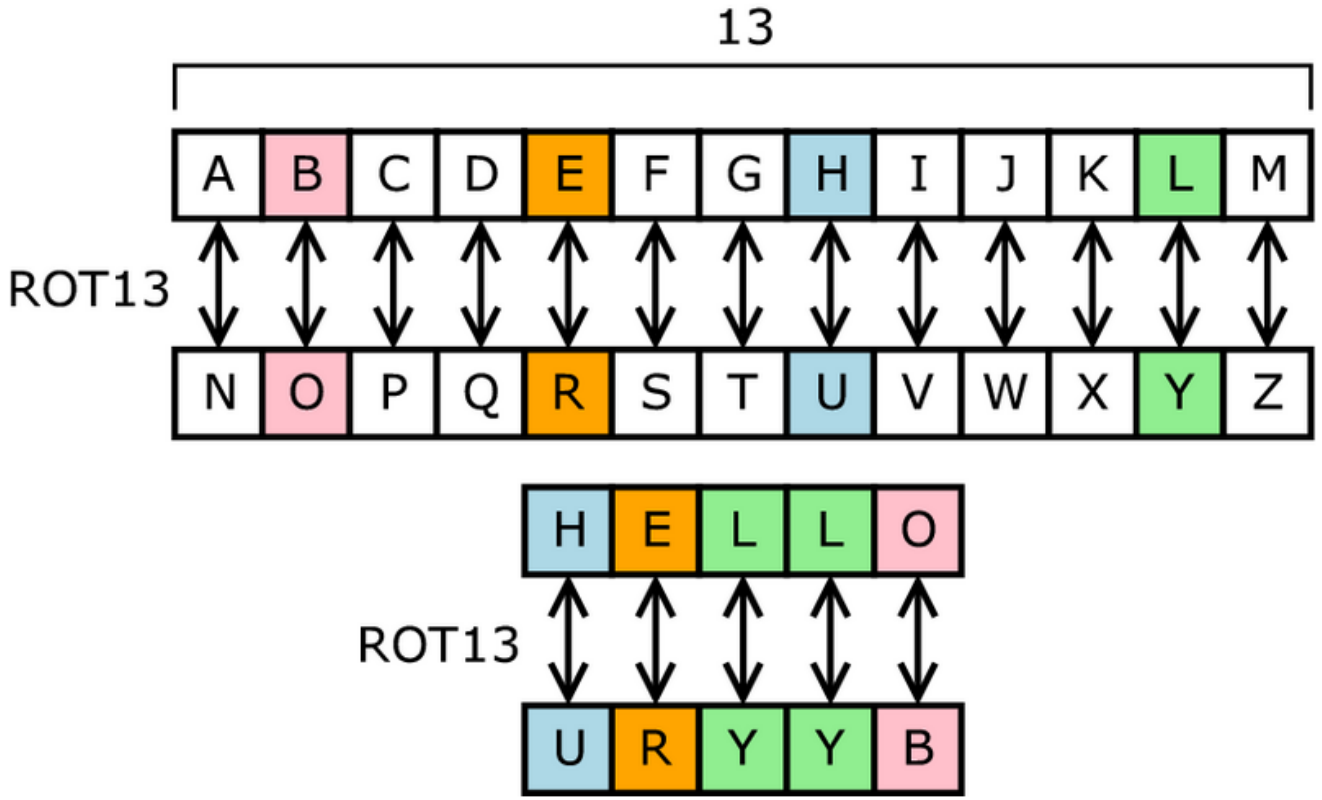
k = 4 menghasilkan pesan `dolls` `(boneka)`

k = 11 menghasilkan `wheel` `(roda)` .

Nilai k mana yang benar?

Jika kasusnya demikian, maka lakukan dekripsi terhadap potongan cipherteks lain tetapi cukup menggunakan *k* = 4 dan *k* = 11 agar dapat disimpulkan kunci mana yang benar.

- Di dalam sistem operasi Unix, `ROT13` adalah fungsi menggunakan *Caesar cipher* dengan pergeseran *k* = 13



Sumber gambar: Wikipedia

- Contoh: ROT13(ROTATE) = EBGNGR
- Nama "ROT13" berasal dari *net.jokes* (*hhtp://groups.google.com/group/net.jokes*) (tahun 1980)

- ROT13 biasanya digunakan di dalam forum *online* untuk menyandikan jawaban teka-teki, kuis, canda, dsb

- Enkripsi arsip dua kali dengan ROT13 menghasilkan pesan semula:

$$P = \text{ROT13}(\text{ROT13}(P))$$

sebab $\text{ROT}_{13}(\text{ROT}_{13}(x)) = \text{ROT}_{26}(x) = x$

- Jadi dekripsi cukup dilakukan dengan mengenkripsi cipherteks kembali dengan ROT13

Jenis-jenis *Cipher* Substitusi

1. ***Cipher* abjad-tunggal** (*monoalphabetic cipher*)

   - setiap huruf plainteks diganti dengan satu huruf cipherteks

2. ***Cipher* substitusi homofonik** (*Homophonic substitution cipher*)

   - setiap huruf plainteks diganti dengan salah satu huruf atau pasangan huruf cipherteks yang mungkin.

3. ***Cipher* abjad-majemuk** (*Polyalpabetic substitution cipher*)

   - setiap huruf plainteks diganti menggunakan kunci yang berbeda.

4. **Cipher substitusi poligram** (*Polygram substitution cipher*)

   - setiap pasangan huruf plainteks diganti dengan pasangan huruf cipherteks

Cipher abjad-tunggal (*monoalphabetic cipher*)

- Pada cipher abjad-tunggal, satu huruf plainteks diganti dengan satu huruf cipherteks yang bersesuaian.

- *Caesar cipher* adalah salah satu *cipher* yang tergolong ke dalam *cipher* abjad-tunggal dengan tabel substitusi berupa hasil dari pergeseran tiga huruf ke kanan.

- Secara umum, kita dapat membentuk tabel subtitusi sembarang. Jumlah kemungkinan tabel substitusi yang dapat dibuat pada sembarang *cipher* abjad-tunggal adalah sebanyak

  26! = 403.291.461.126.605.635.584.000.000

  karena ada 26! cara mempermutasikan 26 huruf alfabet.

- Tabel substitusi dapat dibentuk secara acak:

Plainteks:	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
Cipherteks:	I	J	K	L	Q	R	S	T	U	V	W	D	C	B	A	Z	Y	X	P	O	N	M	H	G	F	E

- Atau berdasarkan kalimat yang mudah diingat:

  Contoh: `di bawah sinar bulan purnama hati resah jadi senang`

  Buang duplikasi huruf menjadi: `dibawhsnrulpmtejg`

  Sambung dengan huruf lain yang belum ada:

  `dibawhsnrulpmtejgcfkoqvwxyz`

  Tabel substitusi:

  `Plainteks :  A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z`

  `Cipherteks :` **`D I B A W H S N R U L P M T E J G C F K O V W X Y Z`**

Cipher Substitusi Homofonik

(*Homophonic substitution cipher*)

- Setiap huruf plainteks dipetakan ke dalam salah satu huruf atau salah satu pasangan huruf cipherteks yang mungkin.

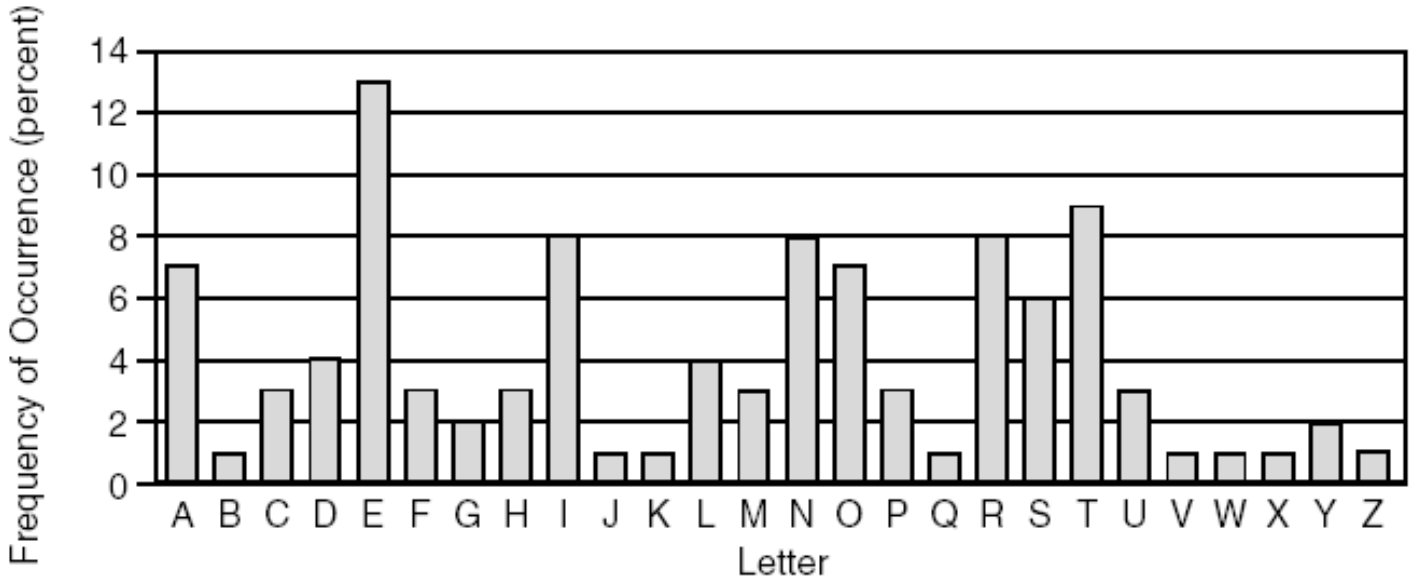
- Tujuan: menyembunyikan hubungan statistik antara plainteks dengan cipherteks

- Fungsi *ciphering* memetakan satu-ke-banyak (*one-to-many*).

Misal: huruf `E` → `AB`, `TQ`, `YT`, `UX` (homofon)

huruf `B` → `EK`, `MF`, `KY` (homofon)

- Contoh: Sebuah teks dengan frekuensi kemunculan huruf sbb:



- Huruf E muncul 13 % → E dapat dikodekan dengan 13 homofon

Huruf Plainteks	Pilihan untuk unit cipherteks
A	BU, TX, YR, MB, OP, TF, QA
B	ER, FY
C	IU, CW, PL
D	NQ, VT, OA, GP
E	ZX, BR, JO, EW, HT, KC, ND, SO, BO, VE, KL, JU, HR
F	EP, MS
G	TW, HL
H	OU, HE, JK, AT, KY, IQ
I	GT, UA, CN, HI, WO, ZF, FI
J	OC
K	LV
L	TY, JO, DR, ML
M	GR, KU
N	BE, TF, XO, LG, PS, CD, IE
O	YA, HU, VS, KP, BD, JZ, OL
P	IR, JA
Q	SP
R	UL, XP, TA, RL, LW, DO
S	EQ, IF, TK, PN, GL, TB
T	SI, GD, KI, MA, EL, ET, MS, MT, TL
U	FA, BI, SF
V	GM
W	TG, AS
X	FI, TM
Y	SR, DS
Z	AR

- Pasangan huruf di dalam tabel substitusi ini dibentuk secara acak
- Tidak boleh ada pasangan huruf yang sama
- Enkripsi dan dekripsi menggunakan tabel
- Tabel substiusi juga berlaku sebagai kunci, harus dirahasiakan

- Unit cipherteks mana yang dipilih diantara semua homofon ditentukan secara acak.
- Contoh:

  Plainteks: `kripto`

  Cipherteks: `LV TA FI JA MS KP`

- Enkripsi: satu-ke-banyak
- Dekripsi: satu-ke-satu
- Dekripsi menggunakan tabel homofon yang sama.

Huruf Plainteks	Pilihan untuk unit cipherteks
A	BU, TX, YR, MB, OP, TF, QA
B	ER, FY
C	IU, CW, PL
D	NQ, VT, OA, GP
E	ZX, BR, JO, EW, HT, KC, ND, SO, BO, VE, KL, JU, HR
F	EP, MS
G	TW, HL
H	OU, HE, JK, AT, KY, IQ
I	GT, UA, CN, HI, WO, ZF, FI
J	OC
K	LV
L	TY, JO, DR, ML
M	GR, KU
N	BE, TF, XO, LG, PS, CD, IE
O	YA, HU, VS, KP, BD, JZ, OL
P	IR, JA
Q	SP
R	UL, XP, TA, RL, LW, DO
S	EQ, IF, TK, PN, GL, TB
T	SI, GD, KI, MA, EL, ET, MS, MT, TL
U	FA, BI, SF
V	GM
W	TG, AS
X	FI, TM
Y	SR, DS
Z	AR

Cipher Abjad-Majemuk
(*Polyalpabetic substitution cipher*)

- *Cipher* abjad-tunggal: satu kunci untuk semua huruf plainteks

- *Cipher* abjad-majemuk: setiap huruf menggunakan kunci berbeda.

- *Cipher* abjad-majemuk dibuat dari sejumlah *cipher* abjad-tunggal, masing-masing dengan kunci yang berbeda.

Contoh 1: (spasi dibuang)

P : kriptografiklasikdengancipheralfabetmajemuk

K : LAMPIONLAMPIONLAMPIONLAMPIONLAMPIONLAMPIONL

C : VRUEBCTCARXSZNDIWSMBTLNOXXVRCAXUIPREMMYMAHV

Perhitungan:

(K + L) mod 26 = (10 + 11) mod 26 = 21 = **V**

(R + A) mod 26 = (17 + 0) mod 26 = 17 = **R**

(I + M) mod 26 = (8 + 12) mod 26 = 20 = **U**

dst

Contoh 2: (dengan spasi)

P: she sells sea shells by the seashore

K: KEY KEYKE YKE YKEYKE YK EYK EYKEYKEY

C: CLC CIJVW QOE QRIJVW ZI XFO WCKWFYVC

Bentuk umum cipher abjad-majemuk:

- Kunci:

$$K = k_1 k_2 \ldots k_m$$ (ket: m = panjang kunci)

- Plainteks:

$$P = p_1 p_2 \ldots p_m p_{m+1} \ldots p_{2m} \ldots$$

- Cipherteks:

$$C = E_K(P) = f_{k1}(p_1)\, f_{k2}(p_2) \ldots f_{km}(p_m)\, f_{k1}(p_{m+1}) \ldots f_{km}(p_{2m}) \ldots$$

- Untuk m = 1, *cipher*-nya ekivalen dengan *cipher* abjad-tunggal.

Cipher substitusi poligram
(*Polygram substitution cipher*)

- Blok huruf plainteks disubstitusi dengan blok cipherteks.
- Misalnya `AS` diganti dengan **`RT`**, `BY` diganti dengan **`SL`**

- Jika unit huruf plainteks/cipherteks panjangnya 2 huruf, maka ia disebut digram (*bigram*), jika 3 huruf disebut ternari-gram, dst
- Tujuannya: distribusi kemunculan poligram menjadi *flat* (datar), dan hal ini menyulitkan analisis frekuensi.

- Contoh: Playfair cipher (akan dijelaskan pada kuliah selanjutnya)

Cipher Transposisi

- Cipherteks diperoleh dengan mengubah posisi huruf di dalam plainteks.

- Dengan kata lain, algoritma ini melakukan *transpose* terhadap rangkaian huruf di dalam plainteks.

- Nama lain untuk metode ini adalah *cipher* **permutasi**, karena *transpose* setiap karakter di dalam teks sama dengan mempermutasikan karakter-karakter tersebut.

Contoh: Misalkan plainteks adalah

```
departemen teknik informatika itb
```

Enkripsi:

```
depart
emente
knikin
format
ikaitb
```

Cipherteks: (baca secara vertikal)

```
DEKFIEMNOKPEIRAANKMIRTIATTENTB     (tanpa spasi)
DEKF IEMN OKPE IRAA NKMI RTIA TTEN TB (4 huruf)
```

Cipherteks: DEKFIEMNOKPEIRAANKMIRTIATTENTB

Dekripsi: Bagi panjang cipherteks dengan kunci.

(Pada contoh ini, 30 / 6 = 5)

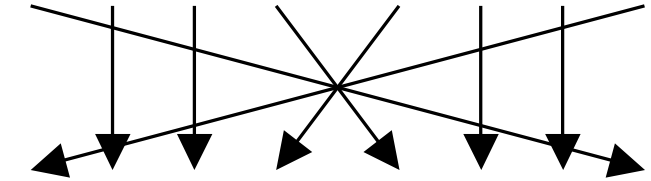
```
DEKFI
EMNOK
PEIRA
ANKMI
RTIAT
TENTB
```

Plainteks: (baca secara vertikal)

```
departemen teknik informatika itb
```

- Contoh lain: Plainteks: `ITB GANESHA SEPULUH`
- Bagi menjadi blok-blok 8-huruf. Jika < 8, tambahkan huruf *dummy*.

1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
I	T	B	G	A	N	E	S	H	A	S	E	P	U	L	U	H	A	B	C	D	E	F	G



S	T	B	A	G	N	E	I	U	A	S	P	E	U	L	H	G	A	B	D	C	E	F	H
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8

- Cipherteks: **STBAGNEIUASPEULHGABDCEFH**

Contoh lain. Misalkan plainteks adalah

```
CRYPTOGRAPHY AND DATA SECURITY
```

Plainteks disusun menjadi 3 baris (k = 3) seperti di bawah ini:

```
C     T     A     A     A     E     I
 R   P  O  R   P  Y  N  D  T  S  C   R   T
   Y     G     H     D     A     U     Y
```

maka cipherteksnya adalah

```
CTAAAEIRPORPYNDTSCRTYGHDAUY
```

Super-enkripsi

- Menggabungkan *cipher* substitusi dengan *cipher* transposisi.
- Disebut juga *product cipher*
- Mula-mula pesan dienkripsi dengan *cipher* substitusi, selanjutnya hasilnya dienkripsi dengan *cipher* transposisi (atau sebaliknya).

Contoh. Plainteks `hello world`

- dienkripsi dengan *caesar cipher* menjadi `KHOOR ZRUOG`
- kemudian hasil ini dienkripsi lagi dengan *cipher* transposisi (*k* = 4):

```
KHOO
RZRU
OGZZ
```

→ Cipherteks akhir adalah: `KROHZGORZOUZ`

- *Cipher* modern menggunakan konsep kombinasi *cipher* substitusi dan *cipher* transposisi, namun operasinya dibuat sekompleks mungkin

-