Bahan kuliah IF4020 Kriptografi

Kriptografi Modern

Oleh: Dr. Rinaldi Munir

Program Studi Informatika
Sekolah Teknik Elektro dan Informatika
ITB

Pendahuluan

- Beroperasi dalam mode bit atau *byte* (algoritma kriptografi klasik beroperasi dalam mode karakter)

  → kunci, plainteks, cipherteks, diproses dalam rangkaian bit/byte

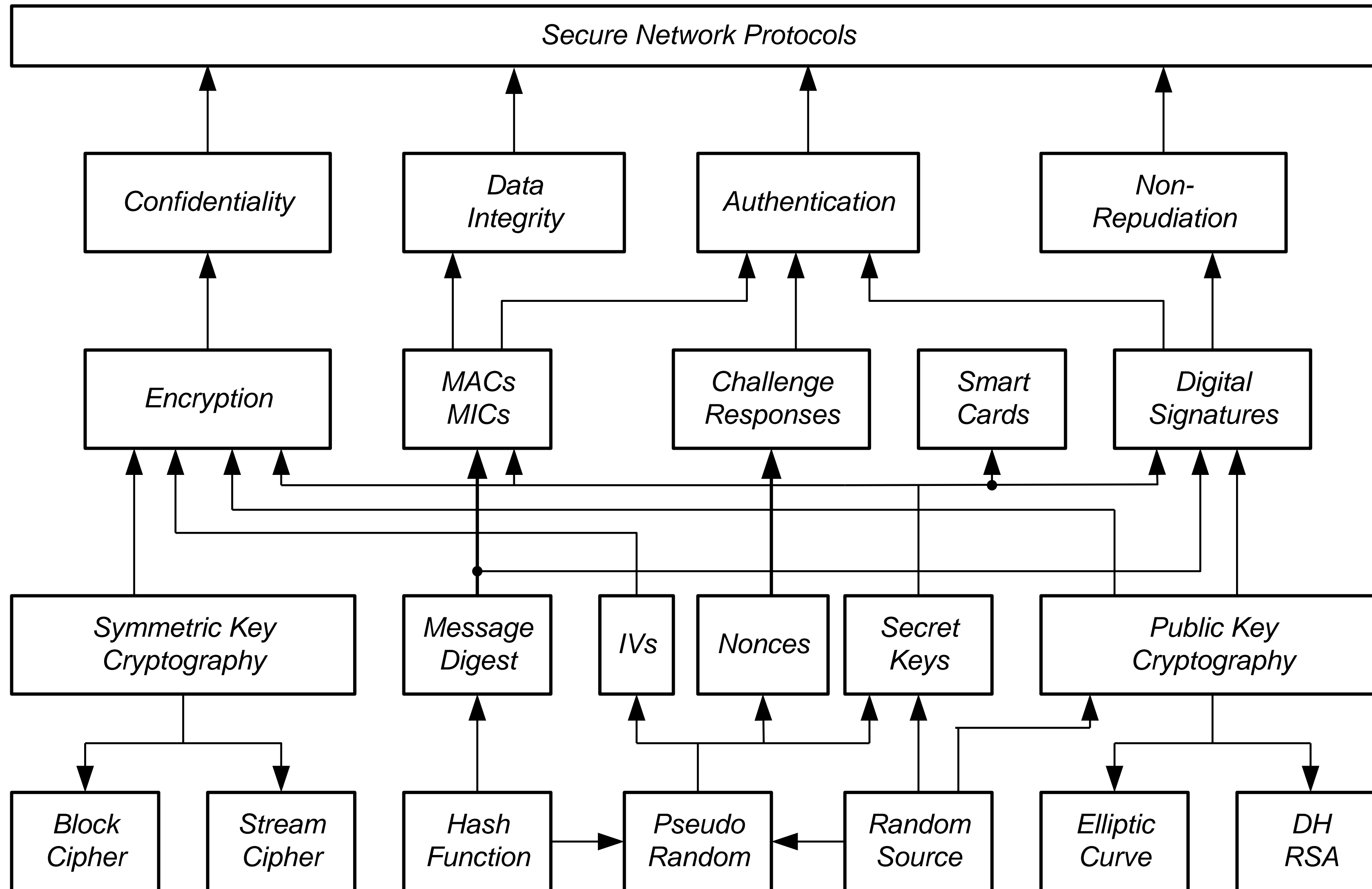
  → operasi bit **xor** paling banyak digunakan

- Tetap menggunakan gagasan pada algoritma klasik: substitusi dan transposisi, tetapi lebih kompleks (Tujuan: sangat sulit dikriptanalisis)

- Perkembangan algoritma kriptografi modern didorong oleh penggunaan komputer digital untuk keamanan pesan.

- Komputer digital merepresentasikan data dalam biner.

Diagram Blok Kriptografi Modern



Rangkaian bit

- Pesan (dalam bentuk rangkaian bit) dipecah menjadi beberapa blok
- Contoh: Plainteks `100111010110`

  Bila dibagi menjadi blok 4-bit

  `1001 1101 0110`

  maka setiap blok menyatakan `0` sampai `15`:

  `9 13 6`

Bila plainteks dibagi menjadi blok 3-bit:

```
100    111   010    110
```

maka setiap blok menyatakan 0 sampai 7 :

```
4    7      2      6
```

- *Padding bits*: bit-bit tambahan jika ukuran blok terakhir tidak mencukupi panjang blok

- Contoh: Plainteks 100111010110

  Bila dibagi menjadi blok 5-bit:

  10011 10101 **000**10

Padding bits mengakibatkan ukuran plainteks hasil dekripsi sedikit lebih besar daripada ukuran plainteks semula.

Representasi dalam Heksadesimal

- Pada beberapa algoritma kriptografi, pesan dinyatakan dalam kode Hex:

0000 = 0	0001 = 1	0010 = 2	0011 = 3
0100 = 4	0101 = 5	0011 = 6	0111 = 7
1000 = 8	1011 = 9	1010 = A	1011 = B
1100 = C	1101 = D	1101 = E	1111 = F

- Contoh: plainteks 100111010110 dibagi menjadi blok 4-bit:

  1001 1101 0110

  dalam notasi Hex adalah 9 D 6

Operasi *XOR*

- Paling banyak digunakan di dalam *cipher* modern
- Notasi: $\oplus$
- Operasi:

$0 \oplus 0 = 0$ $\qquad$ $0 \oplus 1 = 1$

$1 \oplus 0 = 1$ $\qquad$ $1 \oplus 1 = 0$

- Operasi XOR = penjumlahan modulo 2:

$0 \oplus 0 = 0 \Leftrightarrow 0 + 0 \pmod 2 = 0$

$0 \oplus 1 = 1 \Leftrightarrow 0 + 1 \pmod 2 = 1$

$1 \oplus 0 = 1 \Leftrightarrow 1 + 0 \pmod 2 = 1$

$1 \oplus 1 = 0 \Leftrightarrow 1 + 1 \pmod 2 = 0$

- Hukum-hukum yang terkait dengan operator XOR:

  (i) $a \oplus a = 0$

  (ii) $a \oplus b = b \oplus a$

  (iii) $a \oplus (b \oplus c) = (a \oplus b) \oplus c$

Operasi XOR *Bitwise*

- Jika dua rangkaian dioperasikan dengan *XOR*, maka operasinya dilakukan dengan meng-*XOR*-kan setiap bit yang berkoresponden dari kedua rangkaian bit tersebut.

  Contoh: $10011 \oplus 11001 = 01010$
  yang dalam hal ini, hasilnya diperoleh sebagai berikut:

$$
\begin{array}{ccccc l}
1 & 0 & 0 & 1 & 1 & \\
1 & 1 & 0 & 0 & 1 & \oplus \\
\hline
1 \oplus 1 & 0 \oplus 1 & 0 \oplus 0 & 1 \oplus 0 & 1 \oplus 1 & \\
0 & 1 & 0 & 1 & 0 &
\end{array}
$$

Cipher dengan XOR

- Sama seperti *Vigenere Cipher*, tetapi dalam mode bit
- Setiap bit plainteks di-*XOR*-kan dengan setiap bit kunci.

Enkripsi: $C = P \oplus K$

Dekripsi: $P = C \oplus K$

Contoh:

plainteks	01100101		(karakter 'e')
kunci	00110101	$\oplus$	(karakter '5')
cipherteks	01010000		(karakter 'P')
kunci	00110101	$\oplus$	(karakter '5')
plainteks	01100101		(karakter 'e')

```
// Enkripsi sembarang berkas dengan
// algoritma XOR sederhana.
#include <iostream>
#include <string.h>
#include <fstream>
#include <stdlib.h>
using namespace std;

main(int argc, char *argv[])
{
 FILE *Fin, *Fout;
 char p, c;
 string K;
 int i;

 Fin = fopen(argv[1], "rb");
 if (Fin == NULL) {
   cout << "Berkas " << argv[1] <<"
tidak ada" << endl;
   exit(0);
 }

 Fout = fopen(argv[2], "wb");

 cout << "Kata kunci : "; cin >> K;
 cout <<"Enkripsi " << argv[1] << "
menjadi " << argv[2] << "...";
 i = 0;
 while (!feof(Fin)) {
   p = getc(Fin);
   c = p ^ K[i];  // operasi XOR
   putc(c, Fout);
   i = (i + 1) % K.length();
 }
 fclose(Fin);
 fclose(Fout);
}
```

(a) enkrip_xor.cpp

```
// Dekripsi sembarang berkas dengan
// algoritma XOR sederhana.
#include <iostream>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
#include <fstream>
using namespace std;

main(int argc, char *argv[])
{
 FILE *Fin, *Fout;
 char p, c;
 string K;
 int i;

 Fin = fopen(argv[1], "rb");
 if (Fin == NULL){
   cout << "Berkas " << argv[1] <<"
tidak ada" << endl;
   exit(0);
 }

 Fout = fopen(argv[2], "wb");

 cout << "Kata kunci : "; cin >> K;
 cout <<"Dekripsi " << argv[1] << "
menjadi " << argv[2] << "...";
 i = 0;
 while (!feof(Fin)) {
   c = getc(Fin);
   p = c ^ K[i];  // operasi XOR
   putc(p, Fout);
   i = (i + 1) % K.length();
 }
 fclose(Fin);
 fclose(Fout);
}
```

(b) dekrip_xor.cpp

Plainteks	Cipherteks
Pada wisuda sarjana baru, ternyata ada seorang wisudawan yang paling muda. Umurnya baru 21 tahun. Ini berarti dia masuk ITB pada umur 17 tahun. Zaman sekarang banyak sarjana masih berusia muda belia.	7 S S H IS A o S G H H KS= b EAYA FA. E S A G(:'y N - GPYE @ES2 E H b A H A S K

Sayangnya, algoritma *XOR* sederhana tidak aman karena cipherteksnya mudah dipecahkan. Panjang kuncinya dapat ditemukan dengan Metode Kasiski.

Kategori *cipher* Berbasis Bit

1. *Cipher* Alir (*Stream Cipher*)

    - beroperasi pada bit tunggal

    - enkripsi/dekripsi bit per bit

2. *Cipher* Blok (*Block Cipher*)

    - beroperasi pada blok bit

      (contoh: 64-bit/blok = 8 karakter/blok)

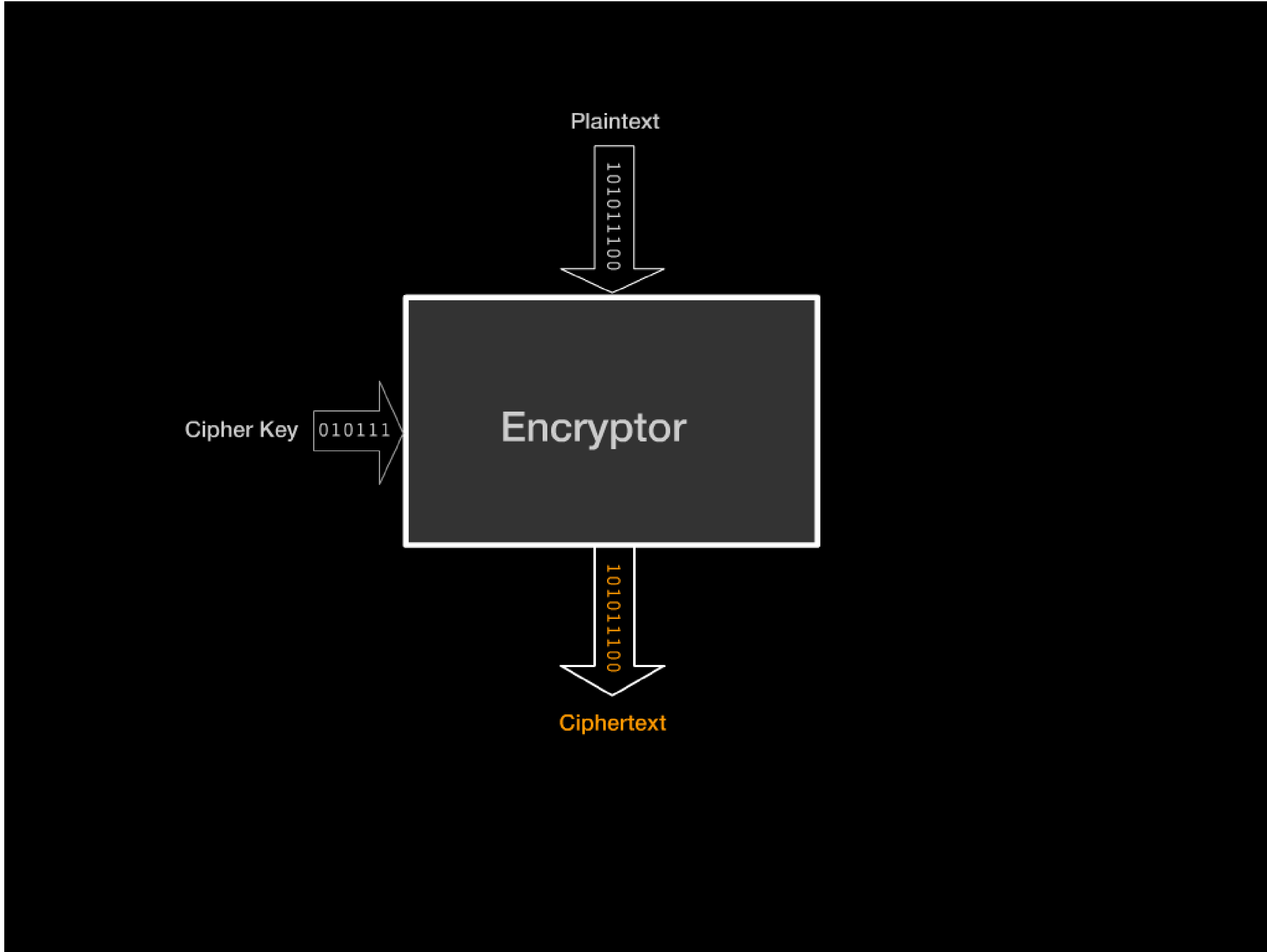
    - enkripsi/dekripsi blok per blok

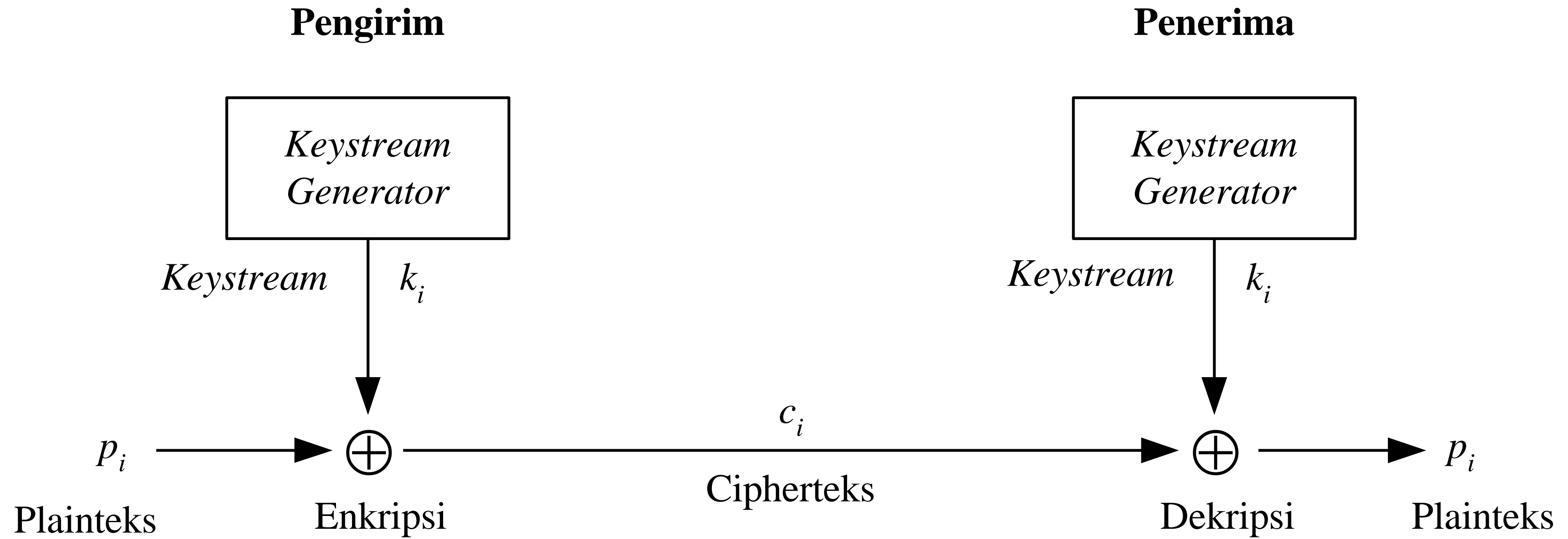
Cipher Alir

- Mengenkripsi plainteks menjadi chiperteks bit per bit (1 bit setiap kali transformasi) atau ***byte*** per *byte* (1 *byte* setiap kali transformasi) dengan kunci *keystream*.

- Diperkenalkan oleh Vernam melalui algoritmanya, **Vernam *Cipher***.

- Vernam *cipher* diadopsi dari *one-time pad cipher*, yang dalam hal ini karakter diganti dengan bit (0 atau 1).


Plaintext
1010111100
Cipher Key
010111
Encryptor
1010111100
Ciphertext



Gambar 1 Konsep *cipher* alir [MEY82]

- Bit-bit kunci untuk enkripsi/dekripsi disebut *keystream*

- *Keystream* dibangkitkan oleh *keystream generator.*

- *Keystream* di-XOR-kan dengan bit-bit plainteks, p_1, p_2, …, menghasilkan aliran bit-bit cipherteks:

$$c_i = p_i \oplus k_i$$

- Di sisi penerima dibangkitkan *keystream* yang sama untuk mendekripsi aliran bit-bit cipherteks:

$$p_i = c_i \oplus k_i$$

- Contoh:

  Plainteks: 1100101
  Keystream: 1000110 $\oplus$
  Cipherteks: 0100011

- Keamanan *cipher* alir bergantung seluruhnya pada *keystream generator*.

- Tinjau 3 kasus yang dihasilkan oleh *keystream generator*:
  1. *Keystream* seluruhnya 0
  2. *Keystream* berulang secara perodik
  3. *Keystream* benar-benar acak

- **Kasus 1**: Jika pembangkit mengeluarkan *keystream* yang seluruhnya nol,

- maka cipherteks = plainteks,

- sebab:

$$c_i = p_i \oplus 0 = p_i$$

dan proses enkripsi menjadi tak-berarti

- **Kasus 2**: Jika pembangkit mengeluarkan *kesytream* yang berulang secara periodik,

- maka algoritma enkripsinya = algoritma enkripsi dengan XOR sederhana yang memiliki tingkat keamanan yang rendah.

- **Kasus 3**: Jika pembangkit mengeluarkan *keystream* benar-benar acak (*truly random*), maka algoritma enkripsinya = *one-time pad* dengan tingkat keamanan yang sempurna.

- Pada kasus ini, panjang *keystream* =   panjang plainteks, dan kita mendapatkan *cipher* alir sebagai *unbreakable cipher*.

- **Kesimpulan**: Tingkat keamanan *cipher* alir terletak antara algoritma XOR sederhana dengan *one-time pad*.
- Semakin acak keluaran yang dihasilkan oleh pembangkit *keystream*, semakin sulit kriptanalis memecahkan cipherteks.

Keystream Generator

- *Keystream generator* diimplementasikan sebagai prosedur yang sama di sisi pengirim dan penerima pesan.

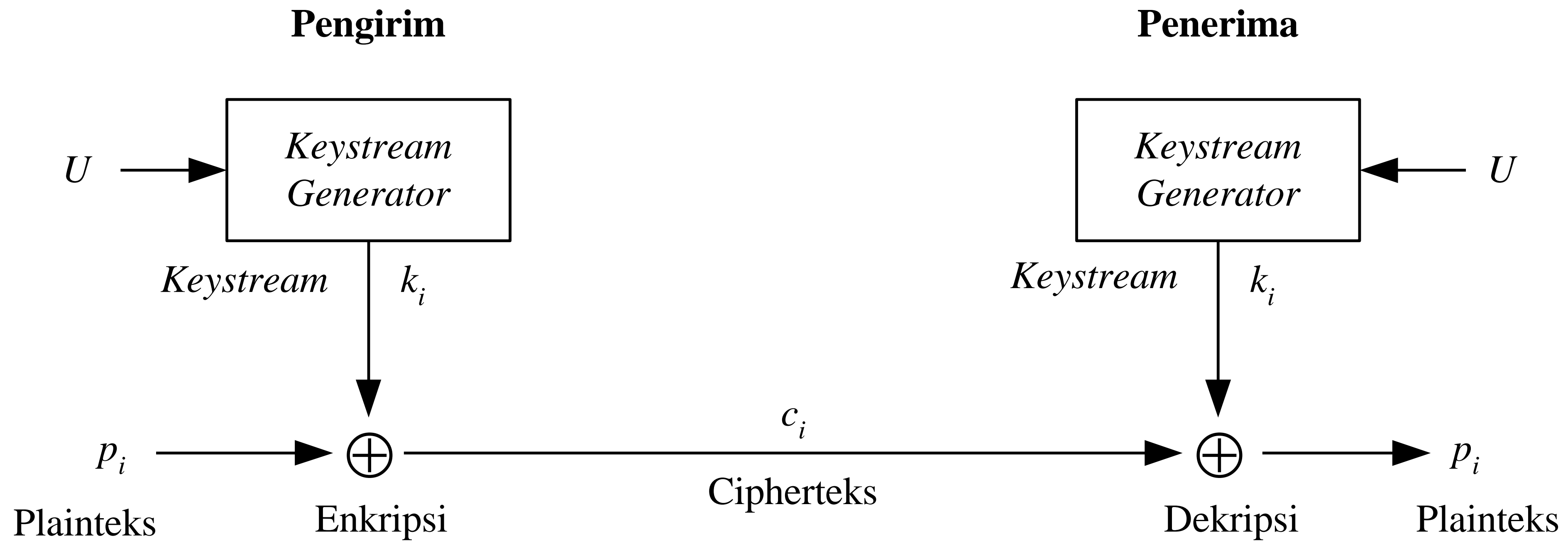
- *Keystream generator* dapat membangkitkan *keystream* berbasis bit per bit atau dalam bentuk blok-blok bit.

- Jika *keystream* berbentuk blok-blok bit, *cipher* blok dapat digunakan untuk untuk memperoleh *cipher* alir.

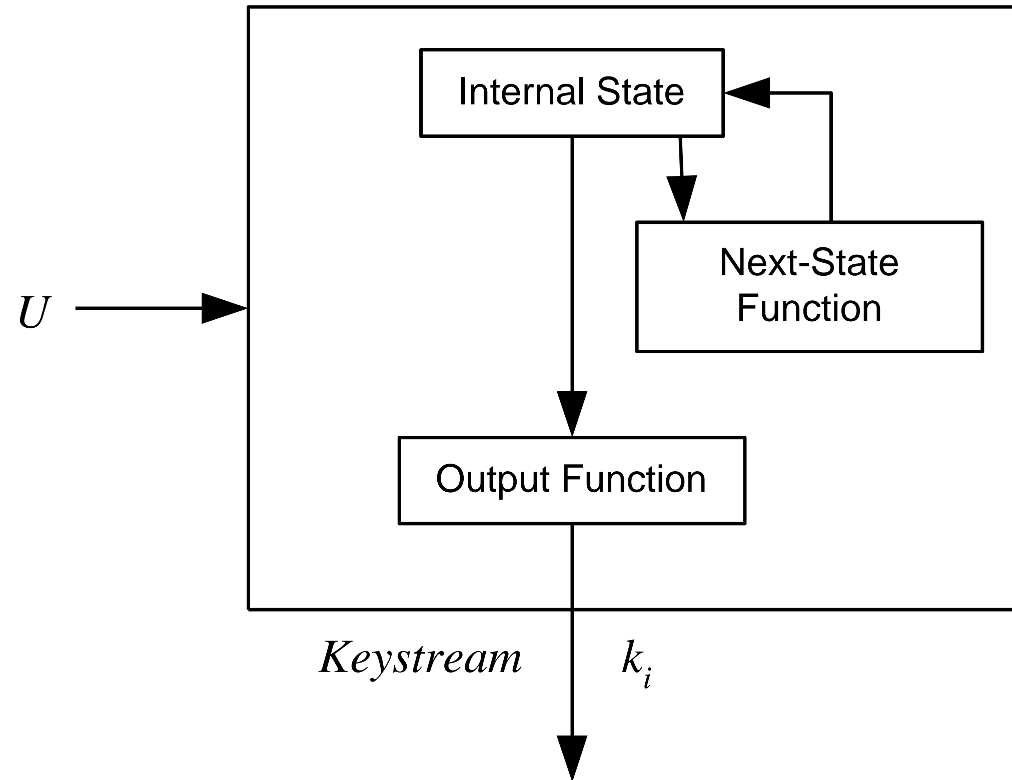
- Prosedur menerima masukan sebuah kunci *U*. Keluaran dari prosedur merupakan fungsi dari *U* (lihat Gambar 2).

- Pengirim dan penerima harus memiliki kunci *U* yang sama. Kunci *U* ini harus dijaga kerahasiaanya.

- Pembangkit harus menghasilkan bit-bit kunci yang kuat secara kriptografi.



Gambar 2 *Cipher* aliran dengan pembangkit bit kunci-alir yang bergantung pada kunci *U* [MEY82].

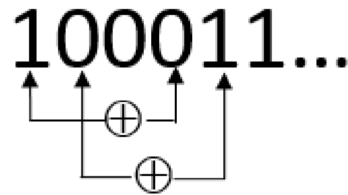


Gambar 3 Proses di dalam pembangkit kunci-alir (*keystream*)

- Contoh: *U* = 1111
  (*U* adalah kunci empat-bit yang dipilih sembarang, kecuali 0000)

  Algoritma sederhana memperoleh *keystream*:
  XOR-kan bit ke-1 dengan bit ke-4 dari empat bit sebelumnya:

  111101011001000

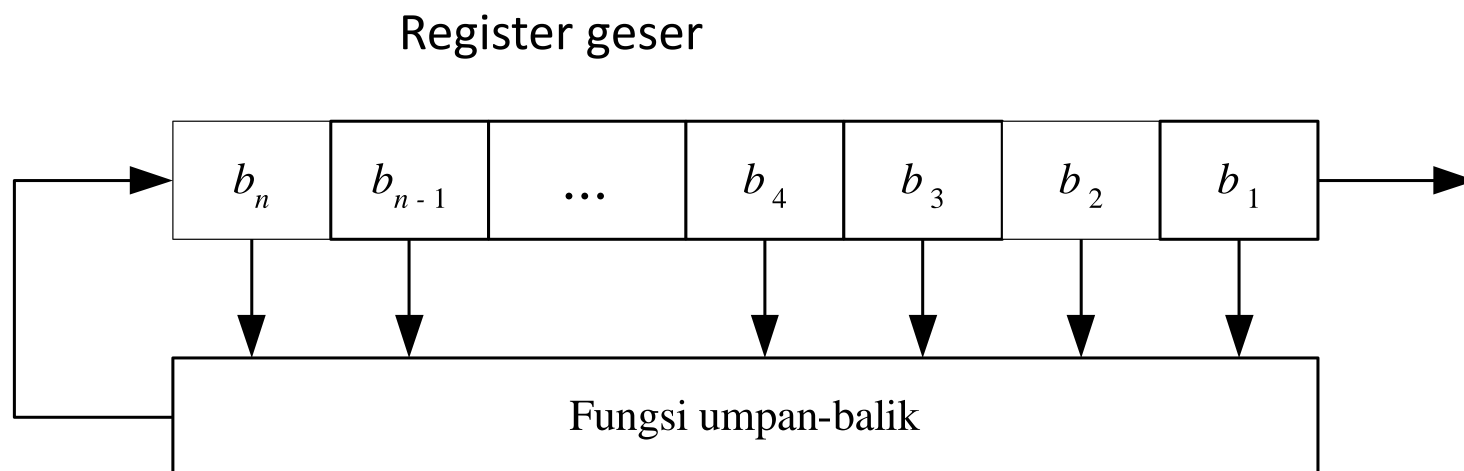


  dan akan berulang setiap 15 bit.

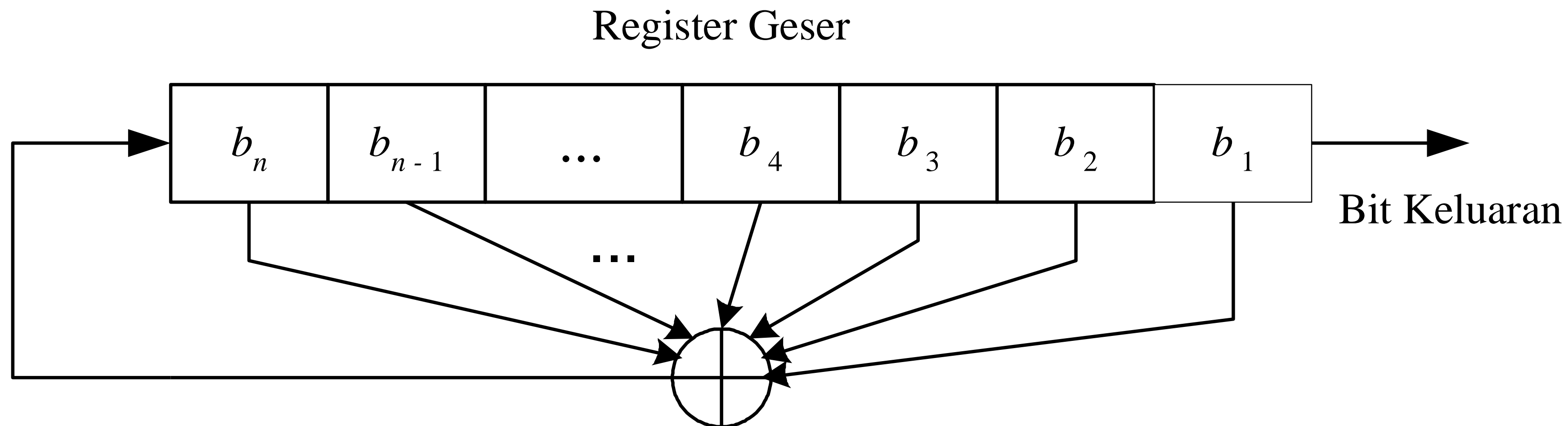
- Secara umum, jika panjang kunci *U* adalah *n* bit, maka bit-bit kunci tidak akan berulang sampai $2^n - 1$ bit.

Feedback Shift Register (LFSR)

- *FSR* adalah contoh sebuah *keystream generator*.
- *FSR* terdiri dari dua bagian: register geser (n bit) dan fungsi umpan balik

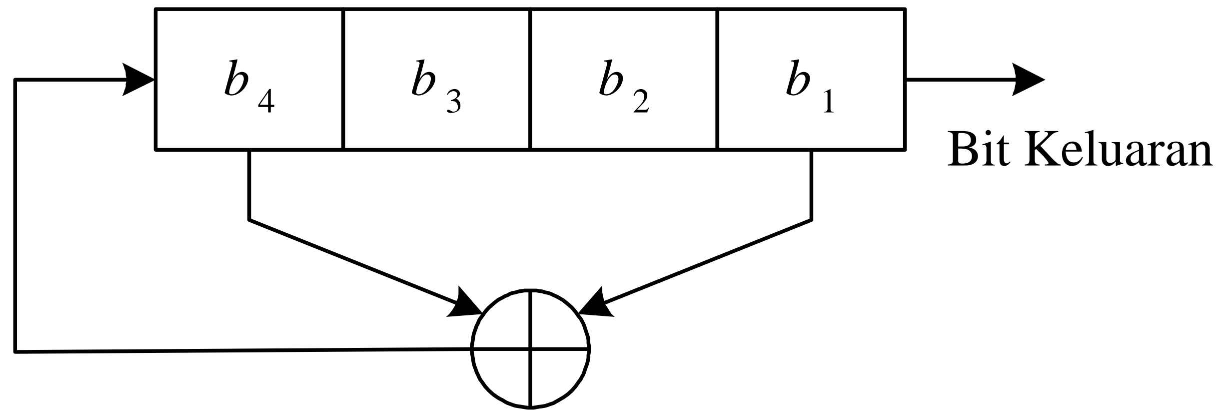


- Contoh FSR adalah LFSR (*Linear Feedback Shift Register*)



- Bit luaran LFSR menjadi *keystream*

- Contoh LFSR 4-bit



- Fungsi umpan balik:

$$b_4 = f(b_1, b_4) = b_1 \oplus b_4$$

- Contoh: jika LFSR 4-bit diinisialisasi dengan 1111

i	Isi Register	Bit Keluaran
0	1 1 1 1	
1	0 1 1 1	1
2	1 0 1 1	1
3	0 1 0 1	1
4	1 0 1 0	1
5	1 1 0 1	0
6	0 1 1 0	1
7	0 0 1 1	0
8	1 0 0 1	1
9	0 1 0 0	1
10	0 0 1 0	0
11	0 0 0 1	0
12	1 0 0 0	1
13	1 1 0 0	0
14	1 1 1 0	0

- Barisan bit acak: 1 1 1 1 0 1 0 1 1 0 0 1 0 0 0 …
- Periode LFSR n-bit: $2^n - 1$

Serangan pada *Cipher* Alir

1. ***Known-plaintext attack***

   Kriptanalis mengetahui potongan *P* dan *C* yang berkoresponden.

   Hasil: *K* untuk potongan *P* tersebut, karena

$$
\begin{aligned}
P \oplus C &= P \oplus (P \oplus K) \\
&= (P \oplus P) \oplus K \\
&= 0 \oplus K \\
&= K
\end{aligned}
$$

Contoh:

P	01100101		(karakter ‘e’)
K	00110101	$\oplus$	(karakter ‘5’)
C	01010000		(karakter ‘P’)
P	01100101	$\oplus$	(karakter ‘e’)
K	00110101		(karakter ‘5’)

2. ***Ciphertext-only attack***

   Terjadi jika *keystream* yang sama digunakan dua kali terhadap potongan plainteks yang berbeda (*keystream reuse attack*)

- Contoh: Kriptanalis memiliki dua potongan cipherteks berbeda (C_1 dan C_2) yang dienkripsi dengan bit-bit kunci yang sama.

  XOR-kan kedua cipherteks tersebut:

$$
\begin{aligned}
C_1 \oplus C_2 &= (P_1 \oplus K) \oplus (P_2 \oplus K) \\
&= (P_1 \oplus P_2) \oplus (K \oplus K) \\
&= (P_1 \oplus P_2) \oplus 0 \\
&= (P_1 \oplus P_2)
\end{aligned}
$$

- Jika P_1 atau P_2 tidak diketahui, dua buah plainteks yang ter-*XOR* satu sama lain ini dapat diketahui dengan menggunakan statistik pesan.

- Misalnya dalam teks Bahasa Inggris, dua buah spasi ter-*XOR*, atau satu spasi dengan huruf ‘e’ yang paling sering muncul, dsb.

- Kriptanalis cukup cerdas untuk mendeduksi kedua plainteks tersebut.

3. ***Flip-bit attack***

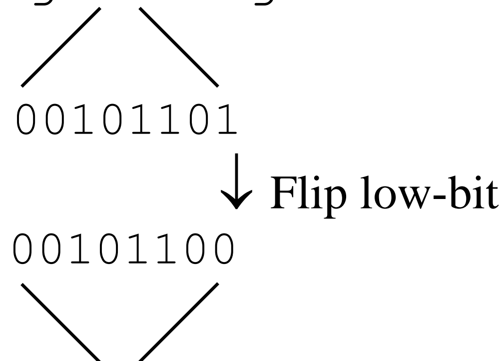
Tujuan: mengubah bit cipherteks tertentu sehingga hasil dekripsinya berubah.

Pengubahan dilakukan dengan membalikkan (*flip*) bit tertentu (0 menjadi 1, atau 1 menjadi 0).

Contoh 9.5:

P : `QT-TRNSFR US $00010,00 FRM ACCNT 123-67 TO`

C: `uhtr07hjLmkyR3j7`**`U`**`kdhj38lkkldkYtr#)oknTkRgh`



C: `uhtr07hjLmkyR3j7`**`T`**`kdhj38lkkldkYtr#)oknTkRgh`

P : `QT-TRNSFR US $10010,00 FRM ACCNT 123-67 TO`

Pengubahan 1 bit `U` dari cipherteks sehingga menjadi `T`.
Hasil dekripsi: $10,00 menjadi $ 10010,00

- Pengubah pesan tidak perlu mengetahui kunci, ia hanya perlu mengetahui posisi pesan yang diminati saja.

- Serangan semacam ini memanfaatkan karakteristik *cipher* aliran yang sudah disebutkan di atas, bahwa kesalahan 1-bit pada cipherteks hanya menghasilkan kesalahan 1-bit pada plainteks hasil dekripsi.

Aplikasi *Cipher* Alir

- *Cipher* alir cocok untuk mengenkripsikan aliran data yang terus menerus melalui saluran komunikasi, misalnya:
  1. Mengenkripsikan data pada saluran yang menghubungkan antara dua buah komputer.
  2. Mengenkripsikan suara pada jaringan telepon *mobile* GSM.

- Alasan: jika bit cipherteks yang diterima mengandung kesalahan, maka hal ini hanya menghasilkan satu bit kesalahan pada waktu dekripsi, karena tiap bit plainteks ditentukan hanya oleh satu bit cipherteks.

Cipher Blok (*Block Cipher*)

- Bit-bit plainteks dibagi menjadi blok-blok bit dengan panjang sama, misalnya 64 bit.

- Panjang kunci enkripsi = panjang blok

- Enkripsi dilakukan terhadap blok bit plainteks menggunakan bit-bit kunci

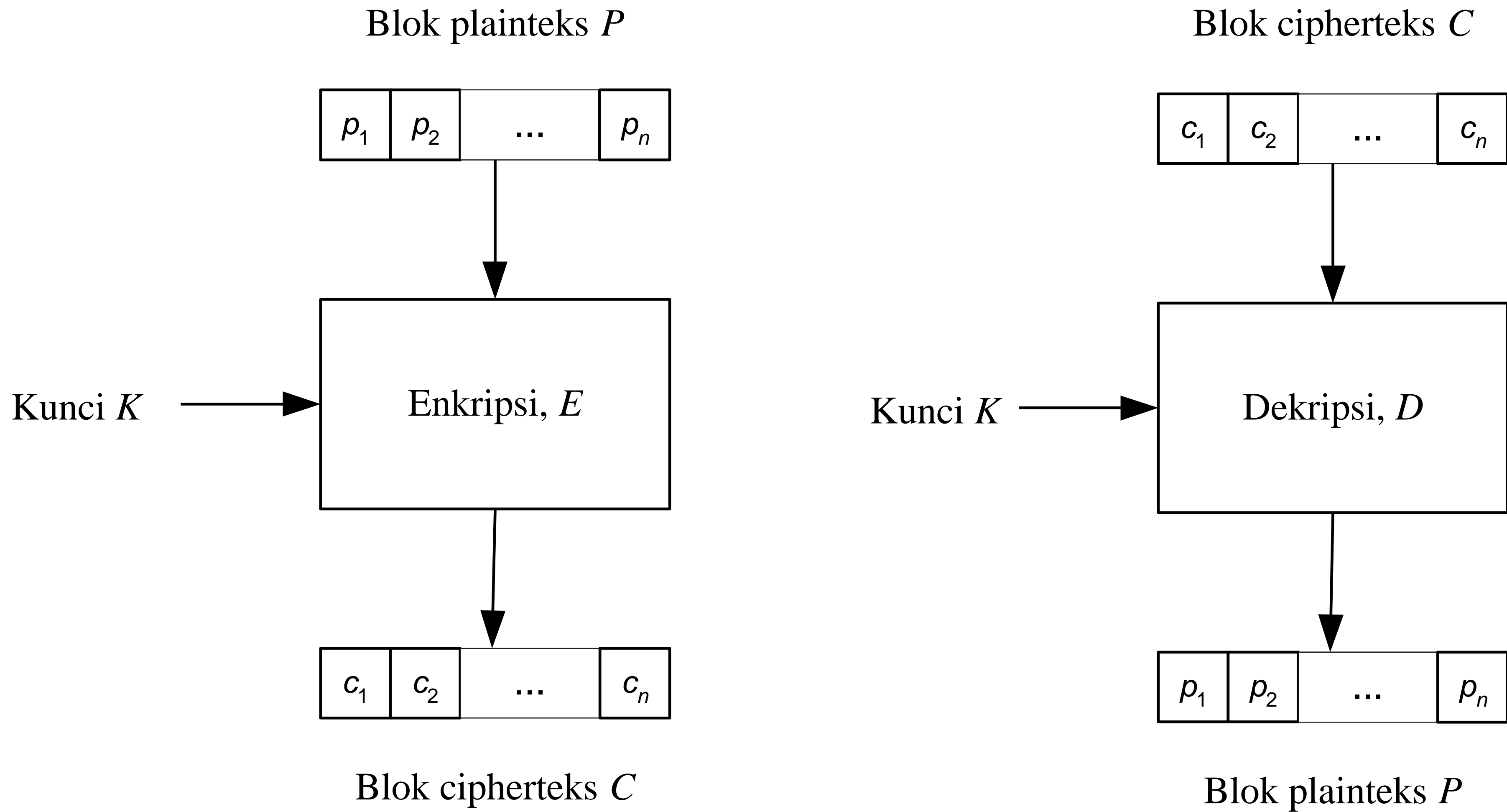
- Algoritma enkripsi menghasilkan blok cipherteks yang panjangnya = blok plainteks.

Blok plainteks berukuran n bit:

$$P = (p_1, p_2, \ldots, p_n), \qquad p_i \in \{0, 1\}$$

Blok cipherteks (C) berukuran n bit:

$$C = (c_1, c_2, \ldots, c_n), \qquad c_i \in \{0, 1\}$$



Skema enkripsi dan dekripsi pada *cipher* blok

Mode Operasi Cipher Blok

- Mode operasi: berkaitan dengan cara blok dioperasikan di dalam fungsi E dan D.

- Ada 5 mode operasi *cipher* blok:
  1. *Electronic Code Book* (*ECB*)
  2. *Cipher Block Chaining* (*CBC*)
  3. *Cipher Feedback* (*CFB*)
  4. *Output Feedback (OFB)*
  5. *Counter Mode*

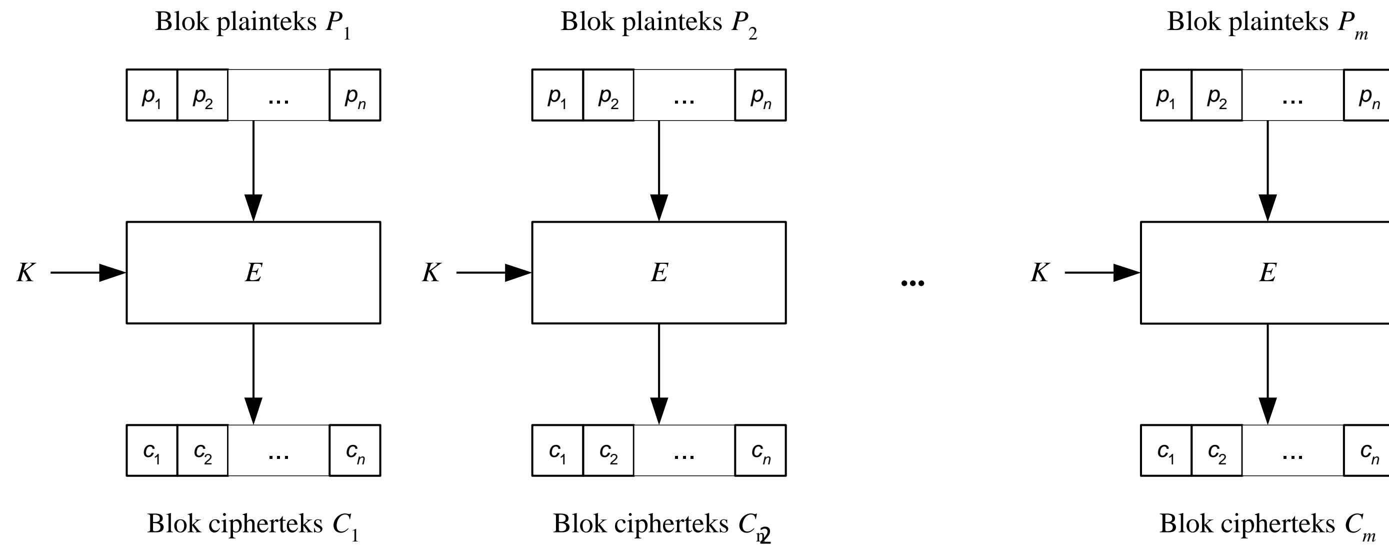
Electronic Code Book (ECB)

- Setiap blok plainteks P_i dienkripsi secara individual dan independen menjadi blok cipherteks C_i .

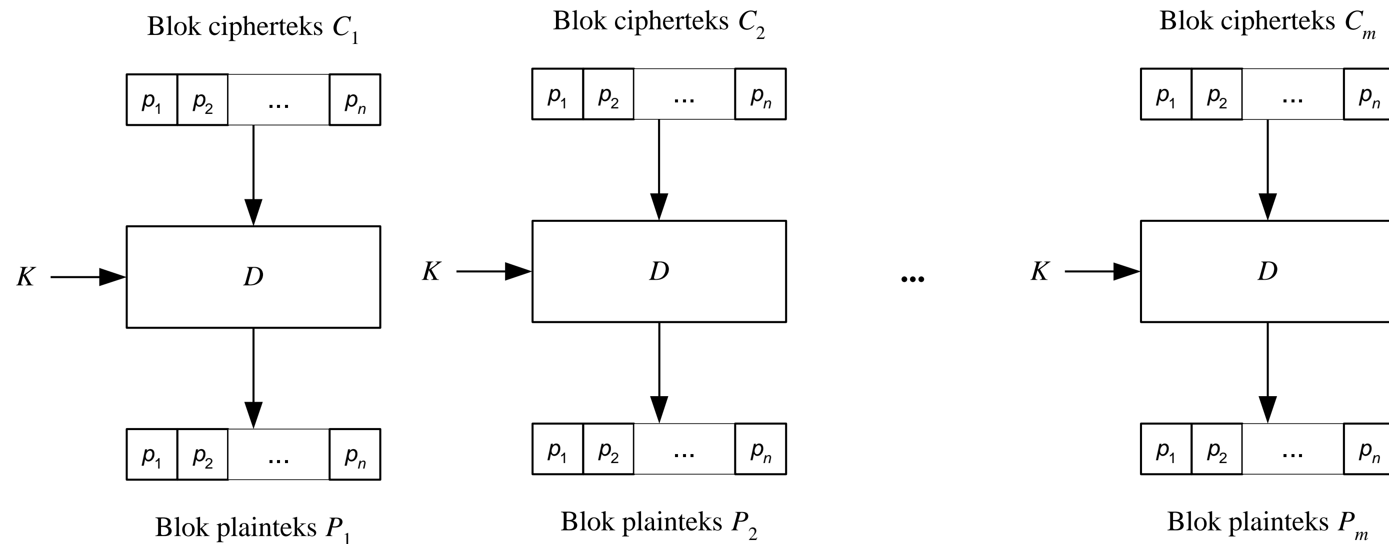
- Enkripsi: $C_i = E_K(P_i)$
  Dekripsi: $P_i = D_K(C_i)$

  yang dalam hal ini, P_i dan C_i masing-masing blok plainteks dan cipherteks ke-i.

Mode ECB



(a) Enkripsi



(b) Dekripsi

- Contoh:

  Plainteks: 10100010001110101001

  Bagi plainteks menjadi blok-blok 4-bit:

  1010 0010 0011 1010 1001

  (dalam notasi HEX :A23A9)

- Kunci (juga 4-bit): 1011

- Misalkan fungsi enkripsi *E* yang sederhana adalah: XOR-kan blok plainteks P_i dengan *K*, kemudian geser secara *wrapping* bit-bit dari $P_i \oplus K$ satu posisi ke kiri:

$$E_K(P) = (P \oplus K) << 1$$

Enkripsi:

	1010	0010	0011	1010	1001
	1011	1011	1011	1011	1011 ⊕
Hasil *XOR*:	0001	1001	1000	0001	0010
Geser 1 bit ke kiri:	0010	0011	0001	0010	0100
Dalam notasi HEX:	2	3	1	2	4

Jadi, hasil enkripsi plainteks

`10100010001110101001` (`A23A9` dalam notasi HEX)

adalah

`00100011000100100100` (`23124` dalam notasi HEX)

- Pada mode ECB, blok plainteks yang sama selalu dienkripsi menjadi blok cipherteks yang sama.

- Pada contoh di atas, blok `1010` muncul dua kali dan selalu dienkripsi menjadi `0010`.

- Karena setiap blok plainteks yang sama selalu dienkripsi menjadi blok cipherteks yang sama, maka secara teoritis dimungkinkan membuat buku kode plainteks dan cipherteks yang berkoresponden (asal kata "*code book*" di dalam *ECB*)

Plainteks	Cipherteks
0000	0100
0001	1001
0010	1010
…	…
1111	1010

- Namun, semakin besar ukuran blok, semakin besar pula ukuran buku kodenya.

- Misalkan jika blok berukuran 64 bit, maka buku kode terdiri dari $2^{64} - 1$ buah kode (*entry*), yang berarti terlalu besar untuk disimpan. Lagipula, setiap kunci mempunyai buku kode yang berbeda.

- Jika panjang plainteks tidak habis dibagi dengan ukuran blok, maka blok terakhir berukuran lebih pendek daripada blok-blok lainnya.

- Untuk itu, kita tambahkan bit-bit *padding* untuk menutupi kekurangan bit blok.

- Misalnya ditambahkan bit 0 semua, atau bit 1 semua, atau bit 0 dan bit 1 berselang-seling.

Keuntungan Mode *ECB*

1. Karena tiap blok plainteks dienkripsi secara independen, maka kita tidak perlu mengenkripsi file secara linear.

   Kita dapat mengenkripsi 5 blok pertama, kemudian blok-blok di akhir, dan kembali ke blok-blok di tengah dan seterusnya.

- Mode *ECB* cocok untuk mengenkripsi arsip (*file*) yang diakses secara acak, misalnya arsip-arsip basisdata.

- Jika basisdata dienkripsi dengan mode *ECB*, maka sembarang *record* dapat dienkripsi atau didekripsi secara independen dari *record* lainnya (dengan asumsi setiap *record* terdiri dari sejumlah blok diskrit yang sama banyaknya).

2. Kesalahan 1 atau lebih bit pada blok cipherteks hanya mempengaruhi cipherteks yang bersangkutan pada waktu dekripsi.

   Blok-blok cipherteks lainnya bila didekripsi tidak terpengaruh oleh kesalahan bit cipherteks tersebut.

Kelemahan ECB

1. Karena bagian plainteks sering berulang (sehingga terdapat blok-blok plainteks yang sama), maka hasil enkripsinya menghasilkan blok cipherteks yang sama

   ➔ contoh berulang: spasi panjang

   ➔ mudah diserang secara statisitik

2. Pihak lawan dapat memanipulasi cipherteks untuk “membodohi” atau mengelabui penerima pesan.

   Contoh: Seseorang mengirim pesan

   `Uang ditransfer lima satu juta rupiah`

Andaikan kriptanalis mengetahui ukuran blok = 2 karakter (16 bit), spasi diabaikan.

Blok-blok cipherteks:

$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}, C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}, C_{16}$

Misalkan kriptanalis berhasil mendekripsi keseluruhan blok cipherteks menjadi plainteks semula.

Kriptanalis membuang blok cipheteks ke-8 dan 9:

$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_{10}, C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}, C_{16}$

Penerima pesan mendekripsi cipherteks yang sudah dimanipulasi dengan kunci yang benar menjadi

`Uang ditransfer satu juta rupiah`

Karena dekripsi menghasilkan pesan yang bermakna, maka penerima menyimpulkan bahwa uang yang dikirim kepadanya sebesar satu juta rupiah.

- Cara mengatasi kelemahan ini: enkripsi tiap blok individual bergantung pada semua blok-blok sebelumnya.

- Akibatnya, blok plainteks yang sama dienkripsi menjadi blok cipherteks berbeda.

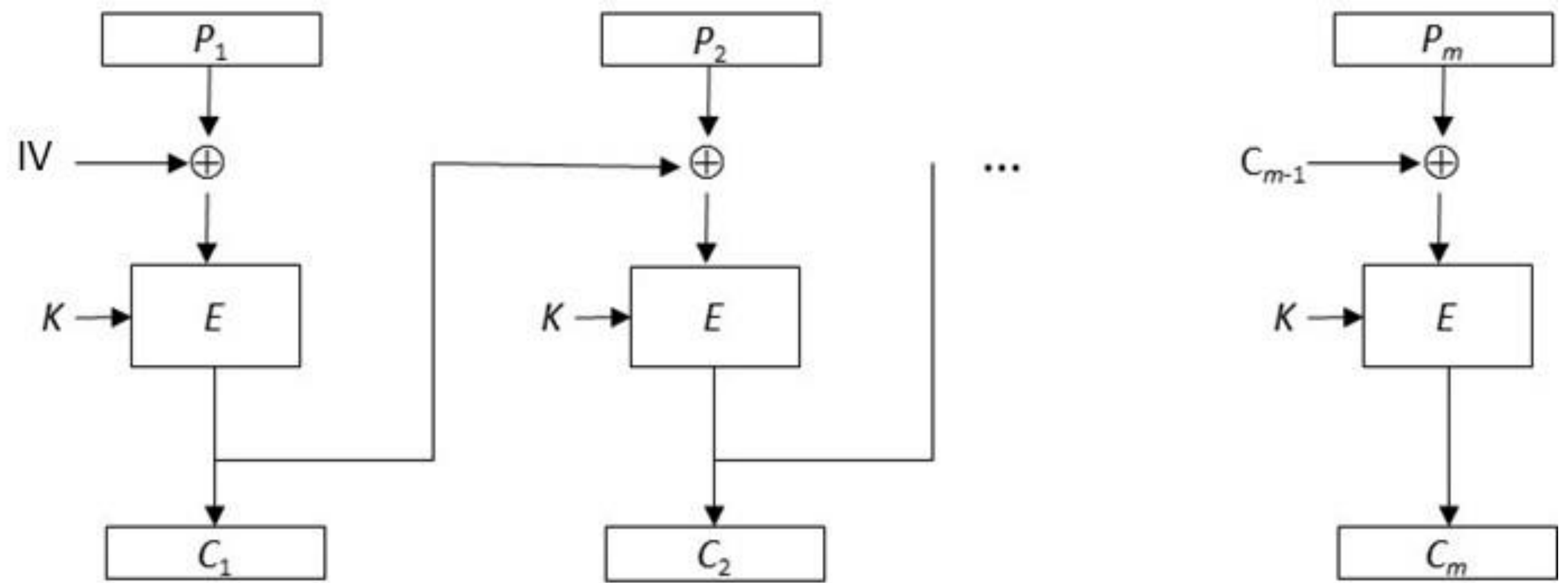
- Prinsip ini mendasari mode *Cipher Block Chaining*.

Cipher Block Chaining(CBC)

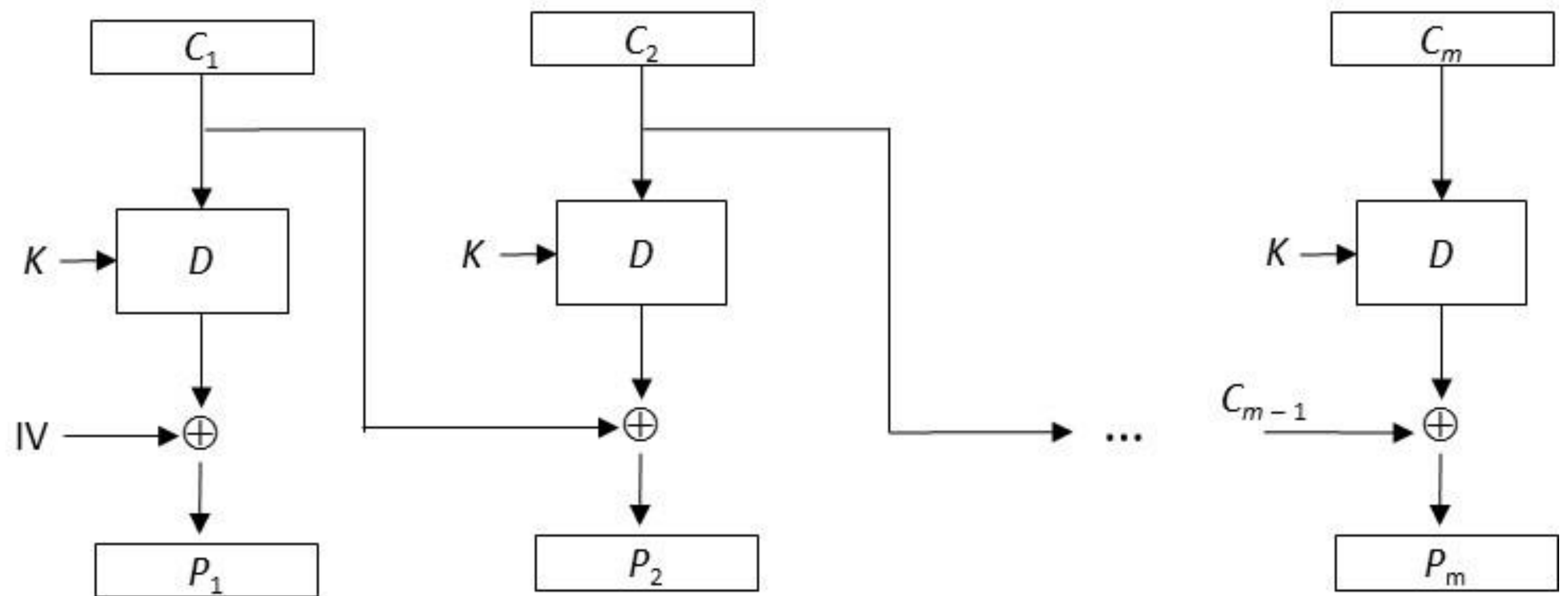
- Tujuan: membuat ketergantungan antar blok.

- Setiap blok cipherteks bergantung tidak hanya pada blok plainteksnya tetapi juga pada seluruh blok plainteks sebelumnya.

- Hasil enkripsi blok sebelumnya di-umpan-balikkan ke dalam enkripsi blok yang *current*.



(a) Skema enkripsi mode CBC



(b) Skema dekripsi mode CBC

- Enkripsi blok pertama memerlukan blok semu (C_0) yang disebut *IV* (*initialization vector*).

- *IV* dapat diberikan oleh pengguna atau dibangkitkan secara acak oleh program.

- Pada dekripsi, blok plainteks diperoleh dengan cara meng-*XOR*-kan *IV* dengan hasil dekripsi terhadap blok cipherteks pertama.

Contoh 9.8. Tinjau kembali plainteks dari Contoh 9.6:

```
10100010001110101001
```

Bagi plainteks menjadi blok-blok yang berukuran 4 bit:

```
1010  0010  0011  1010  1001
```

atau dalam notasi HEX adalah `A23A9`.

Misalkan kunci (*K*) yang digunakan adalah (panjangnya juga 4 bit)

```
1011
```

atau dalam notasi HEX adalah `B`. Sedangkan *IV* yang digunakan seluruhnya bit 0 (Jadi, C_0 = 0000)

Misalkan kunci (K) yang digunakan adalah (panjangnya juga 4 bit)

```
1011
```

atau dalam notasi HEX adalah `B`. Sedangkan *IV* yang digunakan seluruhnya bit 0 (Jadi, C_0 = 0000)

Misalkan fungsi enkripsi E yang sederhana (tetapi lemah) adalah dengan meng-XOR-kan blok plainteks P_i dengan K, kemudian geser secara *wrapping* bit-bit dari $P_i \oplus K$ satu posisi ke kiri.

C_1 diperoleh sebagai berikut:

$P_1 \oplus C_0 =$ 1010 $\oplus$ 0000 = 1010

Enkripsikan hasil ini dengan fungsi E sbb:

1010 $\oplus K =$ 1010 $\oplus$ 1011 = 0001

Geser (*wrapping*) hasil ini satu bit ke kiri: 0010

Jadi, $C_1 =$ 0010 (atau 2 dalam HEX)

C_2 diperoleh sebagai berikut:

$P_2 \oplus C_1 =$ 0010 $\oplus$ 0010 = 0000

0000 $\oplus K =$ 0000 $\oplus$ 1011 = 1011

Geser (*wrapping*) hasil ini satu bit ke kiri: 0111

Jadi, $C_2 =$ 0111 (atau 7 dalam HEX)

C_3 diperoleh sebagai berikut:

$P_3 \oplus C_2 =$ 0011 $\oplus$ 0111 = 0100

0100 $\oplus K =$ 0100 $\oplus$ 1011 = 1111

Geser (*wrapping*) hasil ini satu bit ke kiri: 1111

Jadi, $C_2 =$ 1111 (atau F dalam HEX)

Demikian seterusnya, sehingga plainteks dan cipherteks hasilnya adalah:

Pesan (plainteks):	`A23A9`
Cipherteks (mode *ECB*):	`23124`
Cipherteks (mode *CBC*):	`27FBF`

Keuntungan Mode CBC

Karena blok-blok plainteks yang sama tidak menghasilkan blok-blok cipherteks yang sama, maka kriptanalisis menjadi lebih sulit.

Inilah alasan utama penggunaan mode *CBC* digunakan.

Kelemahan Mode CBC

1. Kesalahan satu bit pada sebuah blok plainteks akan merambat pada blok cipherteks yang berkoresponden dan semua blok cipherteks berikutnya.

2. Tetapi, hal ini berkebalikan pada proses dekripsi. Kesalahan satu bit pada blok cipherteks hanya mempengaruhi blok plainteks yang berkoresponden dan satu bit pada blok plainteks berikutnya (pada posisi bit yang berkoresponden pula).

Cipher-Feedback (CFB)

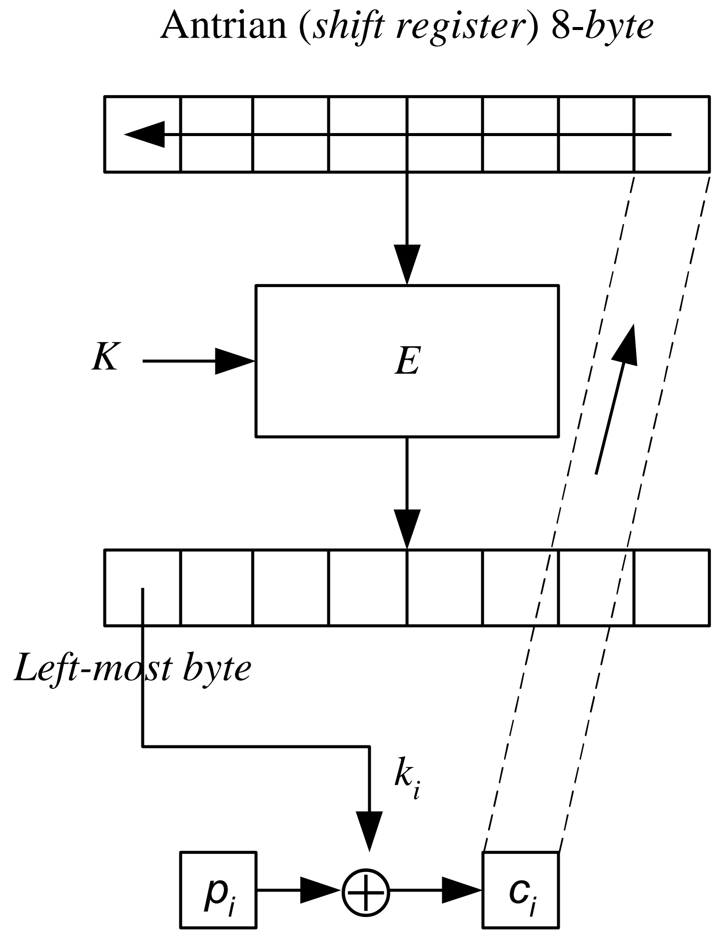
- Mengatasi kelemahan pada mode *CBC* jika diterapkan pada komunikasi data (ukuran blok yang belum lengkap)
- Data dienkripsikan dalam unit yang lebih kecil daripada ukuran blok.
- Unit yang dienkripsikan dapat berupa bit per bit (jadi seperti *cipher* aliran), 2 bit, 3-bit, dan seterusnya.
- Bila unit yang dienkripsikan satu karakter setiap kalinya, maka mode *CFB*-nya disebut *CFB* 8-bit.

- *CFB n*-bit mengenkripsi plainteks sebanyak n bit setiap kalinya, $n \leq m$ (m = ukuran blok).

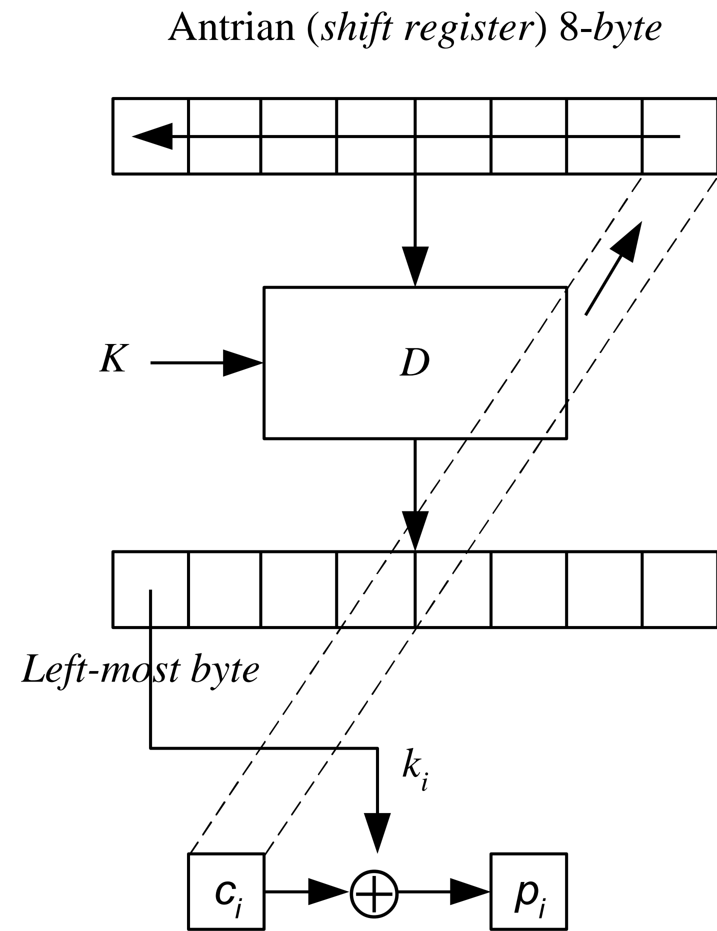
- Dengan kata lain, *CFB* mengenkripsikan *cipher* blok seperti pada *cipher* aliran.

- Mode *CFB* membutuhkan sebuah antrian (*queue*) yang berukuran sama dengan ukuran blok masukan.

- Tinjau mode *CFB* 8-bit yang bekerja pada blok berukuran 64-bit (setara dengan 8 *byte*) pada gambar berikut



(a) Enkripsi



(b) Dekripsi

Secara formal, mode *CFB* n-bit dapat dinyatakan sebagai:

Proses Enkripsi:

$$C_i = P_i \oplus MSB_m(E_K(X_i))$$
$$X_{i+1} = LSB_{m-n}(X_i) \,||\, C_i$$

Proses Dekripsi:

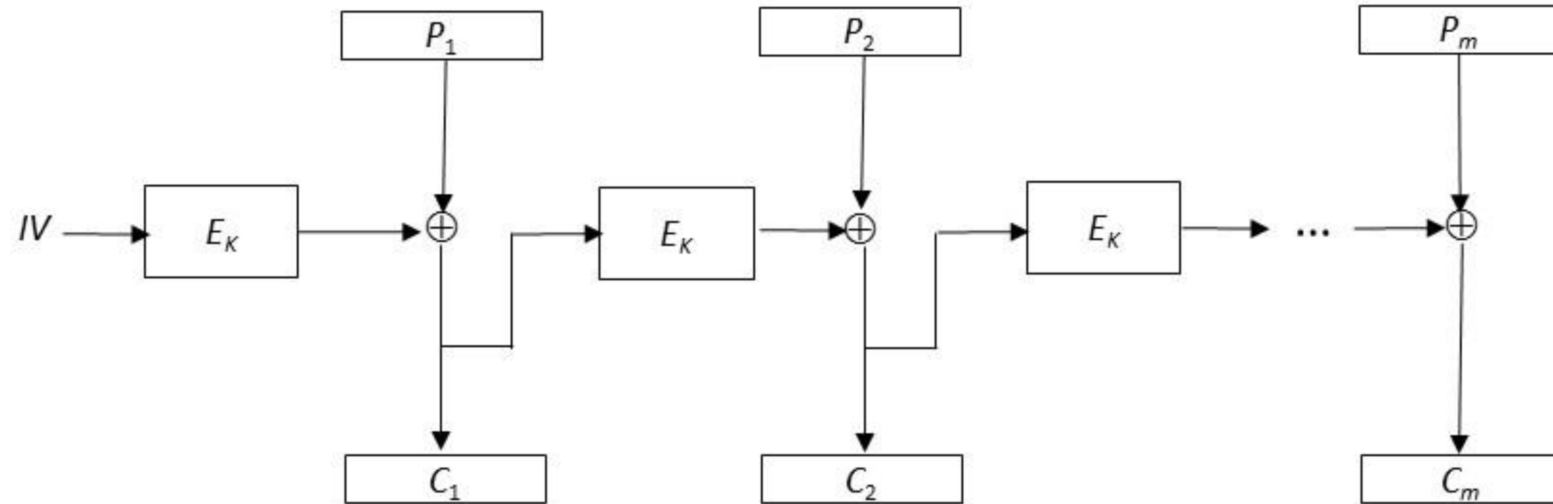
$$P_i = C_i \oplus MSB_m(D_K(X_i))$$
$$X_{i+1} = LSB_{m-n}(X_i) \,||\, C_i$$

yang dalam hal ini,

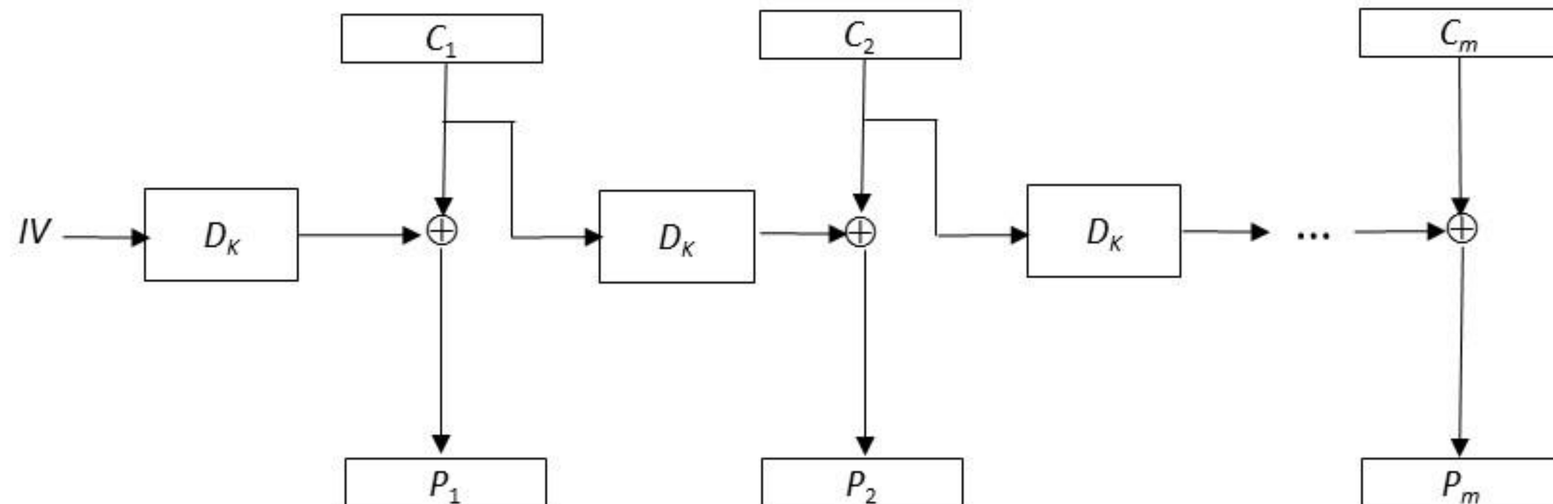
X_i = isi antrian dengan X_1 adalah *IV*
E = fungsi enkripsi dengan algoritma *cipher* blok.
K = kunci
m = panjang blok enkripsi
n = panjang unit enkripsi
|| = operator penyambungan (*concatenation*)
MSB = *Most Significant Byte*
LSB = *Least Significant Byte*

- Jika $m = n$, maka mode *CFB* n-bit adalah sbb:

(a) Enkripsi



(b) Dekripsi



- Dari Gambar di atas dapat dilihat bahwa:

$$C_i = P_i \oplus E_k(C_{i-1})$$
$$P_i = C_i \oplus D_k(C_{i-1})$$

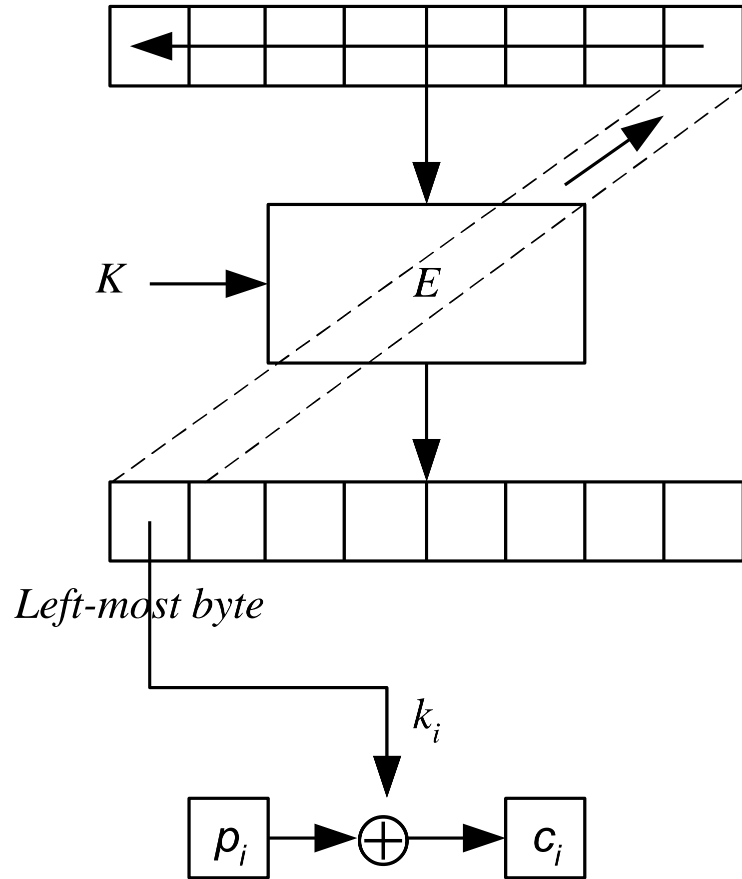
yang dalam hal ini, $C_0 = IV$.

- Kesalahan 1-bit pada blok plainteks akan merambat pada blok-blok cipherteks yang berkoresponden dan blok-blok ciphereks selanjutnya pada proses enkripsi.

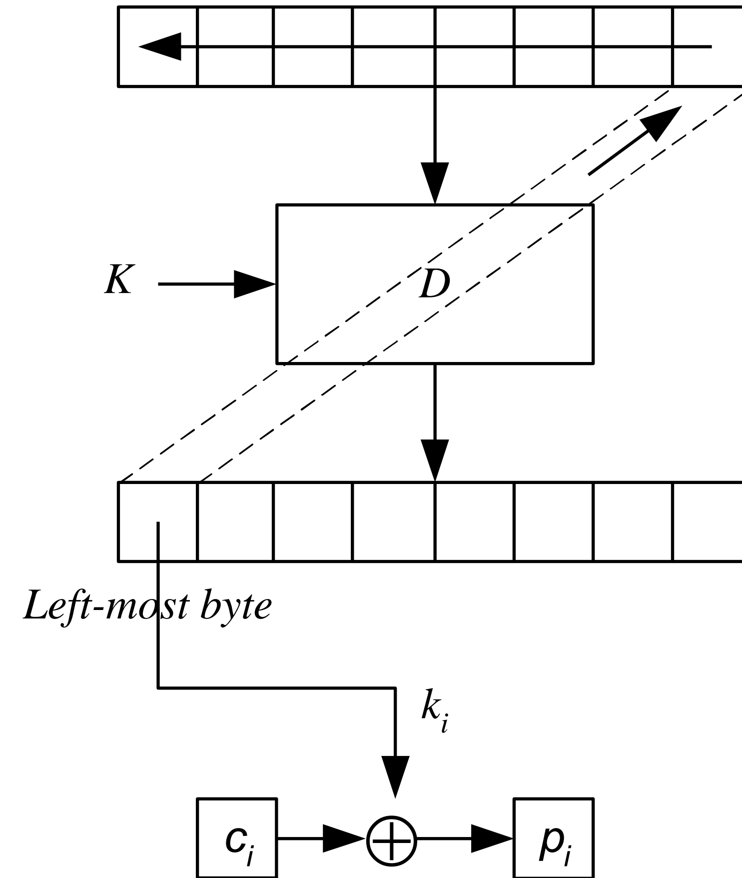
- Hal yang kebalikan terjadi pada proses dekripsi.

Output-Feedback (OFB)

- Mode *OFB* mirip dengan mode *CFB*, kecuali *n*-bit dari hasil enkripsi terhadap antrian disalin menjadi elemen posisi paling kanan di antrian.
- Dekripsi dilakukan sebagai kebalikan dari proses enkripsi.
- Gambar berikut adalah mode *OFB* 8-bit yang bekerja pada blok berukuran 64-bit (setara dengan 8 *byte*).

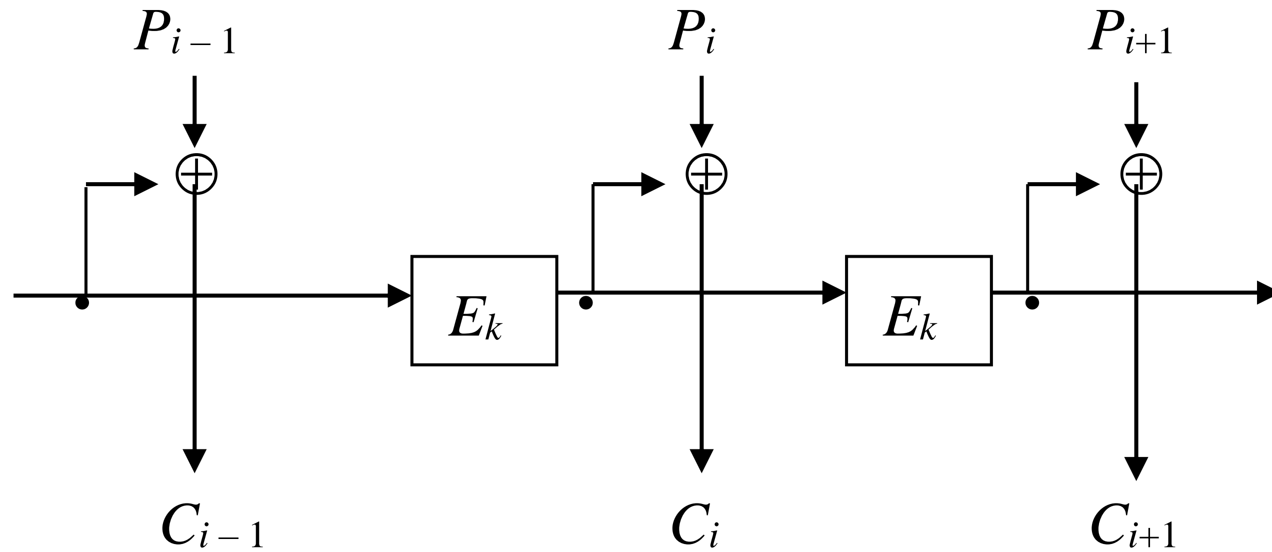


(a) Enkripsi



(b) Dekripsi

Jika $m = n$, maka mode *OFB* n-bit adalah seperti pada Gambar berikut



Gambar 8.9 Enkripsi mode *OFB* n-bit untuk blok n-bit

- Kesalahan 1-bit pada blok plainteks hanya mempengaruhi blok cipherteks yang berkoresponden saja; begitu pula pada proses dekripsi, kesalahan 1-bit pada blok cipherteks hanya mempengaruhi blok plainteks yang bersangkutan saja.

- Karakteristik kesalahan semacam ini cocok untuk transmisi analog yang di-digitisasi, seperti suara atau video, yang dalam hal ini kesalahan 1-bit dapat ditolerir, tetapi penjalaran kesalahan tidak dibolehkan.

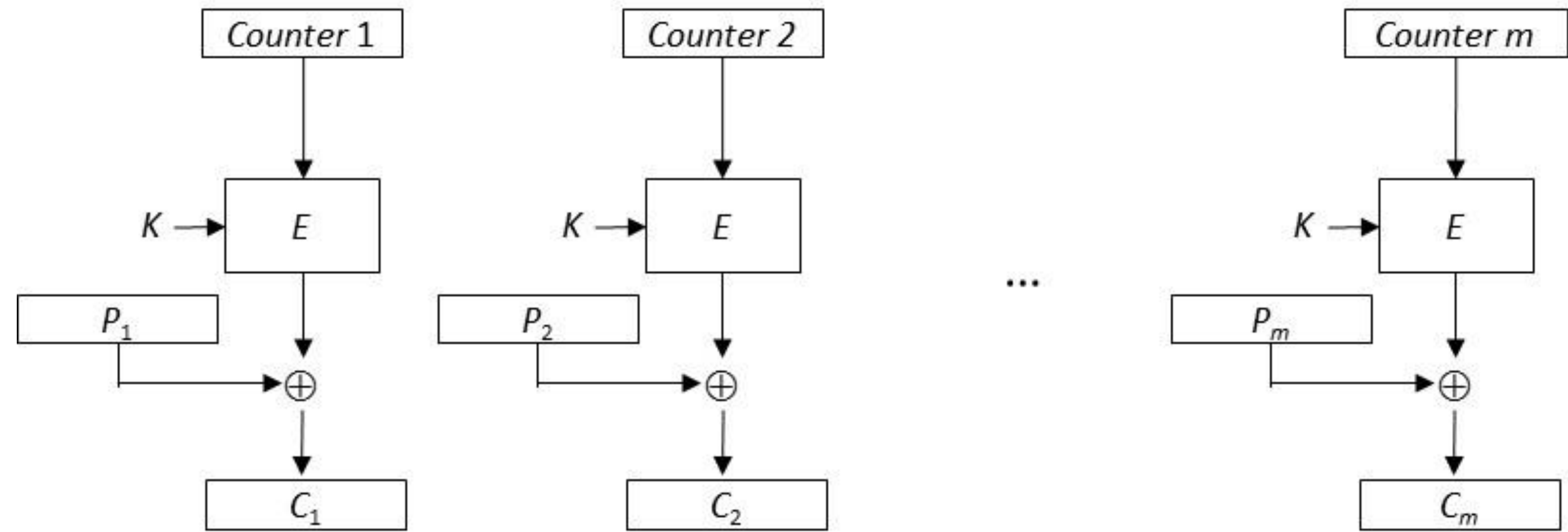
Counter Mode

- Mode *counter* tidak melakukan perantaian (*chaining*) seperti pada *CBC*.

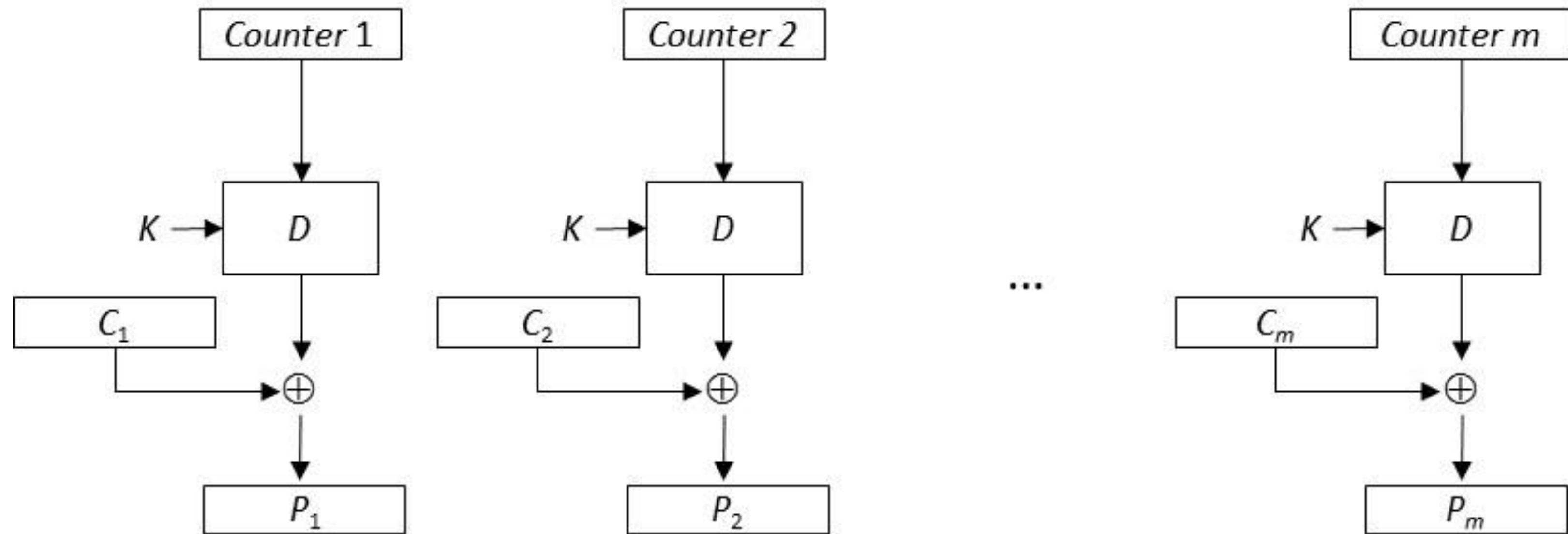
- *Counter* adalah sebuah nilai berupa blok bit yang ukurannya sama dengan ukuran blok plainteks.

- Nilai *counter* harus berbeda dari setiap blok yang dienkripsi. Pada mulanya, untuk enkripsi blok pertama, *counter* diinisialisasi dengan sebuah nilai. Selanjutnya, untuk enkripsi blok-blok berikutnya *counter* dinaikkan nilainya satu.

(a) Enkripsi



(b) Dekripsi



Prinsip-prinsip Perancangan *Cipher* Blok

1. Prinsip *Confusion* dan *Diffusion* dari Shannon.
2. *Cipher* berulang (*iterated cipher*)
3. Jaringan Feistel (*Feistel Network*)
4. Kotak-S (*S-box*)

Prinsip *Confusion* dan *Diffusion* dari Shannon.

- Banyak algoritma kriptografi klasik yang telah berhasil dipecahkan karena distribusi statistik plainteks dalam suatu bahasa diketahui.

- Claude Shannon dalam makalah klasiknya tahun 1949, *Communication theory of secrecy systems*, memperkenalkan prinsip *confusion* dan *diffusion* untuk membuat serangan statistik menjadi rumit.

- Dua prinsip tersebut menjadi panduan dalam merancang algoritma kriptografi.

Confusion

- Prinsip ini menyembunyikan hubungan apapun yang ada antara plainteks, cipherteks, dan kunci.

- Prinsip *confusion* membuat kriptanalis frustasi untuk mencari pola-pola statistik yang muncul pada cipherteks.

- *One-Time Pad* adalah contoh algoritma yang *confuse*.

- *Confusion* dapat direalisasikan dengan menggunakan algoritma substitusi yang kompleks.

- DES mengimplementasikan substitusi dengan menggunakan kotak-S.

Diffusion

- Prinsip ini menyebarkan pengaruh satu bit plainteks atau kunci ke sebanyak mungkin cipherteks.

- Sebagai contoh, pengubahan kecil pada plainteks sebanyak satu atau dua bit menghasilkan perubahan pada cipherteks yang tidak dapat diprediksi.

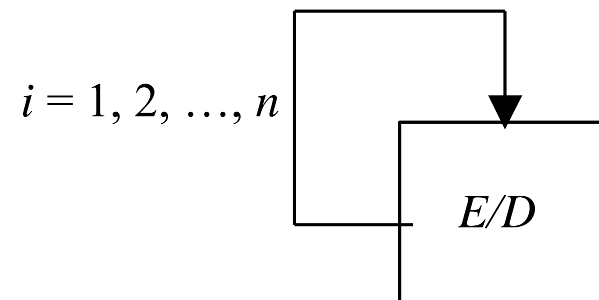
- Mode CBC dan CFB menggunakan prinsip ini

- Pada algoritma DES, *diffusion* direalisasikan dengan menggunakan operasi permutasi.

Cipher Berulang (*Iterated Cipher*)

- Fungsi transformasi sederhana yang mengubah plainteks menjadi cipherteks diulang sejumlah kali.

- Pada setiap putaran digunakan upa-kunci (*subkey*) atau kunci putaran (*round key*) yang dikombinasikan dengan plainteks.



- *Cipher* berulang dinyatakan sebagai

$$C_i = f(C_{i-1}, K_i)$$

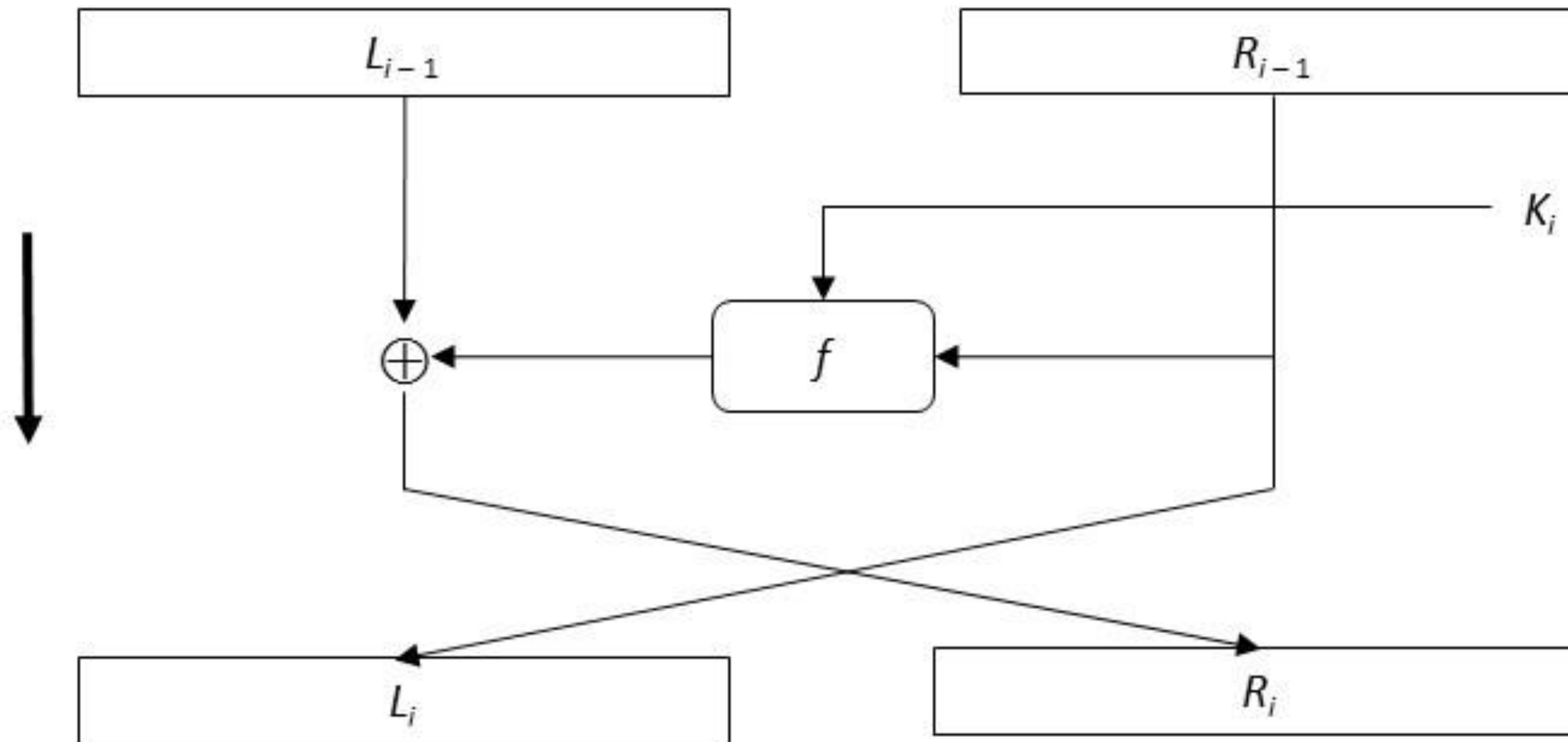
$i = 1, 2, \ldots, r$ (r adalah jumlah putaran).

K_i = upa-kunci (*subkey*) pada putaran ke-i

f = fungsi transformasi (di dalamnya terdapat operasi substitusi, permutasi, dan/atau ekspansi, kompresi).

Plainteks dinyatakan dengan C_0 dan cipherteks dinyatakan dengan C_r.

Jaringan Feistel (*Feistel Network*)



Jaringan *Feistel* pada enkripsi putaran ke-*i*

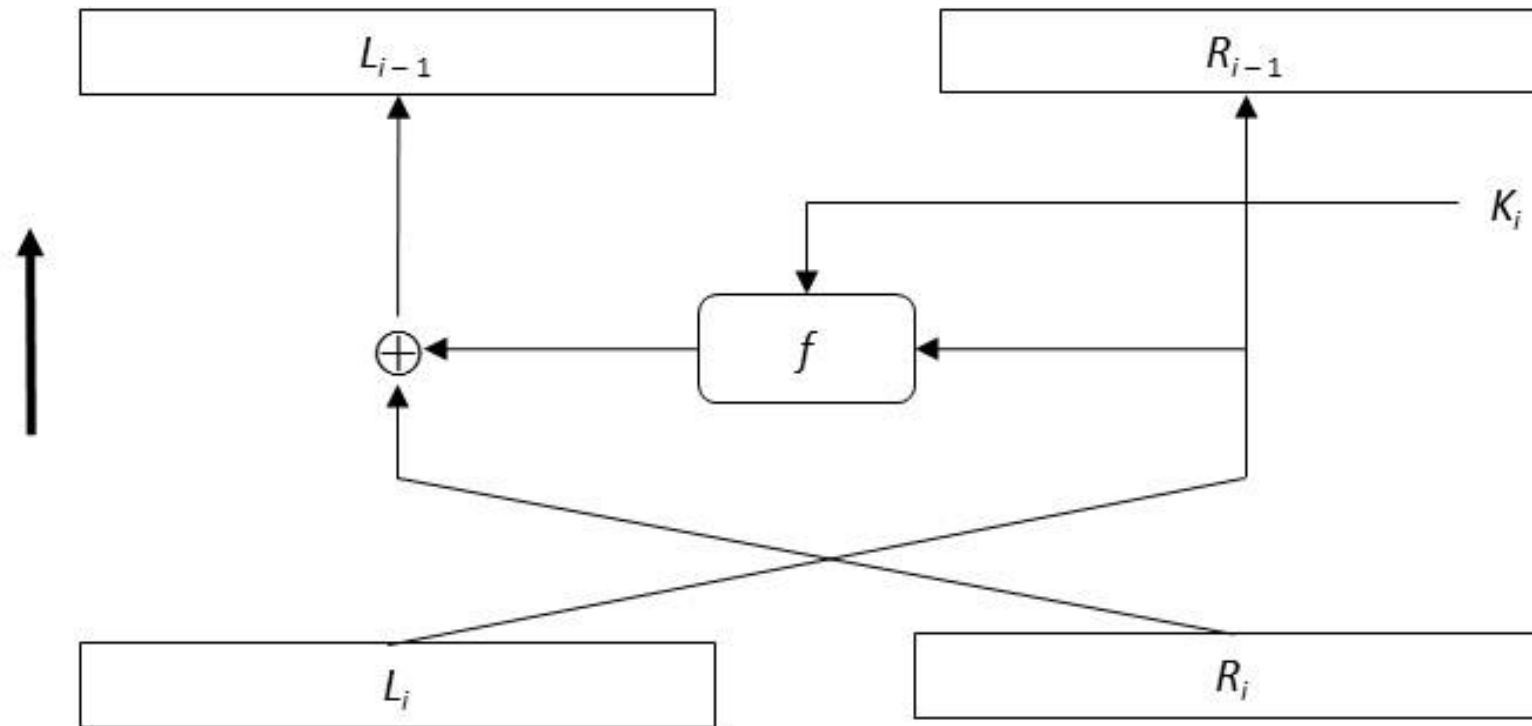
$$L_i = R_{i-1}$$
$$R_i = L_{i-1} \oplus f(R_{i-1}, K_i)$$

- Jaringan *Feistel* banyak dipakai pada algoritma kriptografi *DES*, *LOKI*, *GOST*, *FEAL*, *Lucifer*, *Blowfish*, dan lain-lain karena model ini bersifat *reversible* untuk proses enkripsi dan dekripsi.

- Sifat *reversible* ini membuat kita tidak perlu membuat algoritma baru untuk mendekripsi cipherteks menjadi plainteks.

  Contoh: $L_{i-1} \oplus f(R_{i-1}, K_i) \oplus f(R_{i-1}, K_i) = L_{i-1}$

- Sifat *reversible* tidak bergantung pada fungsi *f* sehingga fungsi *f* dapat dibuat serumit mungkin.



Jaringan *Feistel* pada dekripsi putaran ke-i

$$R_{i-1} = L_i$$
$$L_{i-1} = R_i \oplus f(R_{i-1}, K_i) = R_i \oplus f(L_i, K_i)$$

Kotak-*S* (*S-box*)

- Kotak-*S* adalah matriks yang berisi substitusi sederhana yang memetakan satu atau lebih bit dengan satu atau lebih bit yang lain.

- Pada kebanyakan algoritma *cipher* blok, kotak-*S* memetakan *m* bit masukan menjadi *n* bit keluaran, sehingga kotak-*S* tersebut dinamakan kotak $m \times n$ *S-box*.

- Kotak-*S* merupakan satu-satunya langkah nirlanjar di dalam algoritma, karena operasinya adalah *look-up table*. Masukan dari operasi *look-up table* dijadikan sebagai indeks kotak-*S*, dan keluarannya adalah *entry* di dalam kotak-*S*.

Contoh: Kotak-*S* di dalam algoritma *DES* adalah 6 × 4 *S-box* yang berarti memetakan 6 bit masukan menjadi 4 bit keluaran. Salah satu kotak-*S* yang ada di dalam algoritma DES adalah sebagai berikut:

12	1	10	15	9	2	6	8	0	13	3	4	14	7	5	11
10	15	4	2	7	12	9	5	6	1	13	14	0	11	3	8
9	14	15	5	2	8	12	3	7	0	4	10	1	13	11	6
4	3	2	12	9	5	15	10	11	14	1	7	6	0	8	13

Baris diberi nomor dari 0 sampai 3
Kolom diberi nomor dari 0 sampai 15

Masukan untuk proses substitusi adalah 6 bit,

$$b_1b_2b_3b_4b_5b_6$$

Nomor baris dari tabel ditunjukkan oleh *string* bit b_1b_6
(menyatakan 0 sampai 3 desimal)

Nomor kolom ditunjukkan oleh *string* bit $b_2b_3b_4b_5$
(menyatakan 0 sampai 15)

- Misalkan masukan adalah 110100

  Nomor baris tabel = 10 (baris 2)

  Nomor kolom tabel = 1010 (kolom 10)

  Jadi, substitusi untuk 110100 adalah *entry* pada baris 2 dan kolom 10, yaitu 0100 (atau 4 desimal).

- DES mempunyai 8 buah kotak-S

- Pada AES kotak S hanya ada satu buah:

hex		y															
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	a	b	c	d	e	f
x	0	63	7c	77	7b	f2	6b	6f	c5	30	01	67	2b	fe	d7	ab	76
	1	ca	82	c9	7d	fa	59	47	f0	ad	d4	a2	af	9c	a4	72	c0
	2	b7	fd	93	26	36	3f	f7	cc	34	a5	e5	f1	71	d8	31	15
	3	04	c7	23	c3	18	96	05	9a	07	12	80	e2	eb	27	b2	75
	4	09	83	2c	1a	1b	6e	5a	a0	52	3b	d6	b3	29	e3	2f	84
	5	53	d1	00	ed	20	fc	b1	5b	6a	cb	be	39	4a	4c	58	cf
	6	d0	ef	aa	fb	43	4d	33	85	45	f9	02	7f	50	3c	9f	a8
	7	51	a3	40	8f	92	9d	38	f5	bc	b6	da	21	10	ff	f3	d2
	8	cd	0c	13	ec	5f	97	44	17	c4	a7	7e	3d	64	5d	19	73
	9	60	81	4f	dc	22	2a	90	88	46	ee	b8	14	de	5e	0b	db
	a	e0	32	3a	0a	49	06	24	5c	c2	d3	ac	62	91	95	e4	79
	b	e7	c8	37	6d	8d	d5	4e	a9	6c	56	f4	ea	65	7a	ae	08
	c	ba	78	25	2e	1c	a6	b4	c6	e8	dd	74	1f	4b	bd	8b	8a
	d	70	3e	b5	66	48	03	f6	0e	61	35	57	b9	86	c1	1d	9e
	e	e1	f8	98	11	69	d9	8e	94	9b	1e	87	e9	ce	55	28	df
	f	8c	a1	89	0d	bf	e6	42	68	41	99	2d	0f	b0	54	bb	16

S-BOX

19	a0	9a	e9
3d	f4	c6	f8
e3	e2	8d	48
be	2b	2a	08

hex		y															
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	a	b	c	d	e	f
x	0	63	7c	77	7b	f2	6b	6f	c5	30	01	67	2b	fe	d7	ab	76
	1	ca	82	c9	7d	fa	59	47	f0	ad	d4	a2	af	9c	a4	72	c0
	2	b7	fd	93	26	36	3f	f7	cc	34	a5	e5	f1	71	d8	31	15
	3	04	c7	23	c3	18	96	05	9a	07	12	80	e2	eb	27	b2	75
	4	09	83	2c	1a	1b	6e	5a	a0	52	3b	d6	b3	29	e3	2f	84
	5	53	d1	00	ed	20	fc	b1	5b	6a	cb	be	39	4a	4c	58	cf
	6	d0	ef	aa	fb	43	4d	33	85	45	f9	02	7f	50	3c	9f	a8
	7	51	a3	40	8f	92	9d	38	f5	bc	b6	da	21	10	ff	f3	d2
	8	cd	0c	13	ec	5f	97	44	17	c4	a7	7e	3d	64	5d	19	73
	9	60	81	4f	dc	22	2a	90	88	46	ee	b8	14	de	5e	0b	db
	a	e0	32	3a	0a	49	06	24	5c	c2	d3	ac	62	91	95	e4	79
	b	e7	c8	37	6d	8d	d5	4e	a9	6c	56	f4	ea	65	7a	ae	08
	c	ba	78	25	2e	1c	a6	b4	c6	e8	dd	74	1f	4b	bd	8b	8a
	d	70	3e	b5	66	48	03	f6	0e	61	35	57	b9	86	c1	1d	9e
	e	e1	f8	98	11	69	d9	8e	94	9b	1e	87	e9	ce	55	28	df
	f	8c	a1	89	0d	bf	e6	42	68	41	99	2d	0f	b0	54	bb	16

19

	a0	9a	e9
3d	f4	c6	f8
e3	e2	8d	48
be	2b	2a	08

d4

hex		y															
		0	1	2	3	4	5	6	7				b	c	d	e	f
x	0	63	7c	77	7b	f2	6b	6f	c5				2b	fe	d7	ab	76
	1	ca	82	c9	7d	fa	59	47	f0				af	9c	a4	72	c0
	2	b7	fd	93	26	36	3f	f7	cc				f1	71	d8	31	15
	3	04	c7	23	c3	18	96	05	9a				e2	eb	27	b2	75
	4	09	83	2c	1a	1b	6e	5a	a0	52	3b	d6	b3	29	e3	2f	84
	5	53	d1	00	ed	20	fc	b1	5b	6a	cb	be	39	4a	4c	58	cf
	6	d0	ef	aa	fb	43	4d	33	85	45	f9	02	7f	50	3c	9f	a8
	7	51	a3	40	8f	92	9d	38	f5	bc	b6	da	21	10	ff	f3	d2
	8	cd	0c	13	ec	5f	97	44	17	c4	a7	7e	3d	64	5d	19	73
	9	60	81	4f	dc	22	2a	90	88	46	ee	b8	14	de	5e	0b	db
	a	e0	32	3a	0a	49	06	24	5c	c2	d3	ac	62	91	95	e4	79
	b	e7	c8	37	6d	8d	d5	4e	a9	6c	56	f4	ea	65	7a	ae	08
	c	ba	78	25	2e	1c	a6	b4	c6	e8	dd	74	1f	4b	bd	8b	8a
	d	70	3e	b5	66	48	03	f6	0e	61	35	57	b9	86	c1	1d	9e
	e	e1	f8	98	11	69	d9	8e	94	9b	1e	87	e9	ce	55	28	df
	f	8c	a1	89	0d	bf	e6	42	68	41	99	2d	0f	b0	54	bb	16