II4031 Kriptografi dan Koding

Advanced Encryption Standard (AES)

Oleh: Rinaldi Munir

Program Studi Sistem dan Teknologi Informasi
Sekolah Teknik Elektro dan Informatika
ITB

Latar Belakang

- DES dianggap sudah tidak aman karena kunci dapat ditemukan secara *brute-force*.

- Perlu diusulkan standard algoritma baru sebagai pengganti DES.

- *National Institute of Standards and Technology* (*NIST*) mengusulkan kepada Pemerintah Federal AS untuk sebuah standard kriptografi baru.

- *NIST* mengadakan lomba membuat standard algoritma kriptografi yang baru. Standard tersebut kelak diberi nama ***Advanced Encryption Standard* (*AES*).**

Persyaratan AES:

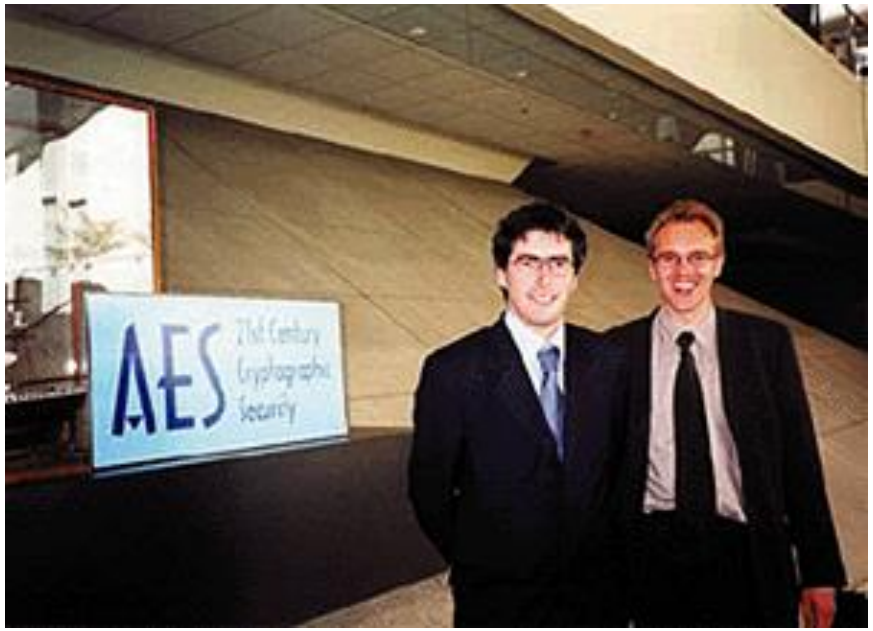
1. Termasuk ke dalam kelompok algoritma kriptografi simetri berbasis *cipher* blok.
2. Seluruh rancangan algoritma harus publik (tidak dirahasiakan, tidak ada yang disembunyikan)
3. Panjang kunci fleksibel: 128, 192, dan 256 bit.
4. Ukuran blok yang dienkripsi adalah 128 bit.
5. Algoritma dapat diimplementasikan baik sebagai *software* maupun *hardware*.

Lima finalis lomba AES:

1. *Rijndael* (dari Vincent **Rij**men da**n** Joan **Dae**men – Be**l**gia, 86 suara)
2. *Serpent* (dari Ross Anderson, Eli Biham, dan Lars Knudsen – Inggris, Israel, dan Norwegia, 59 suara).
3. *Twofish* (dari tim yang diketuai oleh Bruce Schneier – USA, 31 suara)
4. *RC6* (dari Laboratorium *RSA* – USA, 23 suara)
5. *MARS* (dari IBM, 13 suara)

- Pada bulan Oktober 2000, *NIST* mengumumkan untuk memilih Rijndael (dibaca: Rhine-doll)

- Pada bulan November 2001, Rijndael ditetapkan sebagai AES



- Diharapkan Rijndael menjadi standard kriptografi yang dominan paling sedikit selama 10 tahun.

Joan Daemen and Vincent Rijmen, the designers of the Advanced Encryption Standard (Sumber: https://medium.com/@stkgroup/what-is-the-advanced-encryption-standard-and-how-does-it-work-abd1ec582df8

Spesifikasi Algoritma Rijndael

- Rijndael mendukung panjang kunci 128 bit sampai 256 bit dengan step 32 bit (yaitu 128 bit, 160, 192, …, 256 bit).

- Panjang kunci dan ukuran blok dapat dipilih secara independent (tidak harus sama. Misal: panang blok 128 bit, kunci 256 bit).

- Setiap blok dienkripsi dalam sejumlah putaran tertentu, sebagaimana halnya pada *DES*.

- Karena *AES* menetapkan panjang kunci adalah 128, 192, dan 256, maka dikenal *AES*-128, *AES*-192, dan *AES*-256.

	Panjang Kunci (*Nk words*)	Ukuran Blok (*Nb words*)	Jumlah Putaran (*Nr*)
AES-128	4	4	10
AES-192	6	4	12
AES-256	8	4	14

Catatan: 1 *word* = 32 bit

- Secara de-fakto, hanya ada dua varian *AES*, yaitu *AES*-128 dan *AES*-256, karena akan sangat jarang pengguna menggunakan kunci yang panjangnya 192 bit.

- Dengan panjang kunci 128-bit, maka terdapat sebanyak
  $2^{128} = 3{,}4 \times 10^{38}$ kemungkinan kunci.

- Jika komputer tercepat dapat mencoba 1 juta kunci setiap detik, maka akan dibutuhkan waktu $5{,}4 \times 10^{24}$ tahun untuk mencoba seluruh kunci.

- Jika komputer tercepat yang dapat mencoba 1 juta kunci setiap milidetik, maka dibutuhkan waktu $5{,}4 \times 10^{18}$ tahun untuk mencoba seluruh kunci.

- Artinya, AES diharapkan tahan terhadap serangan *exhaustive key search attack* (*brute force attack*)

Algoritma *Rijndael*

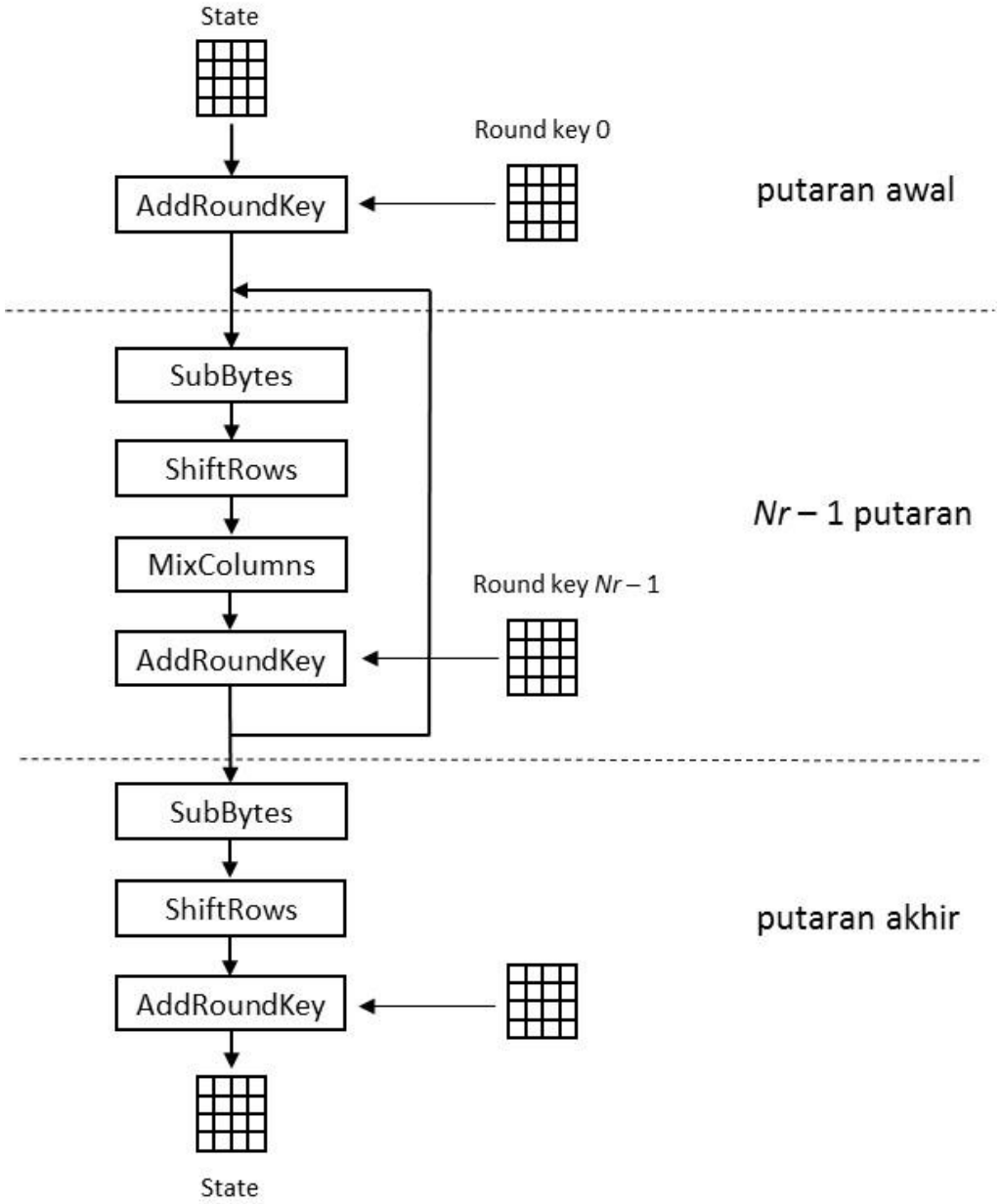
- Yang dijelaskan di sini Rijndael 128-bit (anjang kunci 128 bit)
- Tidak seperti *DES* yang berorientasi bit, *Rijndael* beroperasi dalam orientasi *byte.*
- *Rijndael* tidak menggunakan jaringan Feistel seperti cipher blok lainnya.
- *Enciphering* dilakukan dalam sejumlah putaran (iterate cipher). Setiap putaran mengunakan kunci internal yang berbeda (disebut *round key*).
- *Enciphering* melibatkan operasi substitusi dan permutasi.

- Garis besar Algoritma *Rijndael* yang beroperasi pada blok 128-bit dengan kunci 128-bit adalah sebagai berikut (di luar proses pembangkitan *round key*):

    1. *AddRoundKey*: melakukan *XOR* antara *state* awal (plainteks) dengan *cipher key*. Tahap ini disebut juga *initial round*.

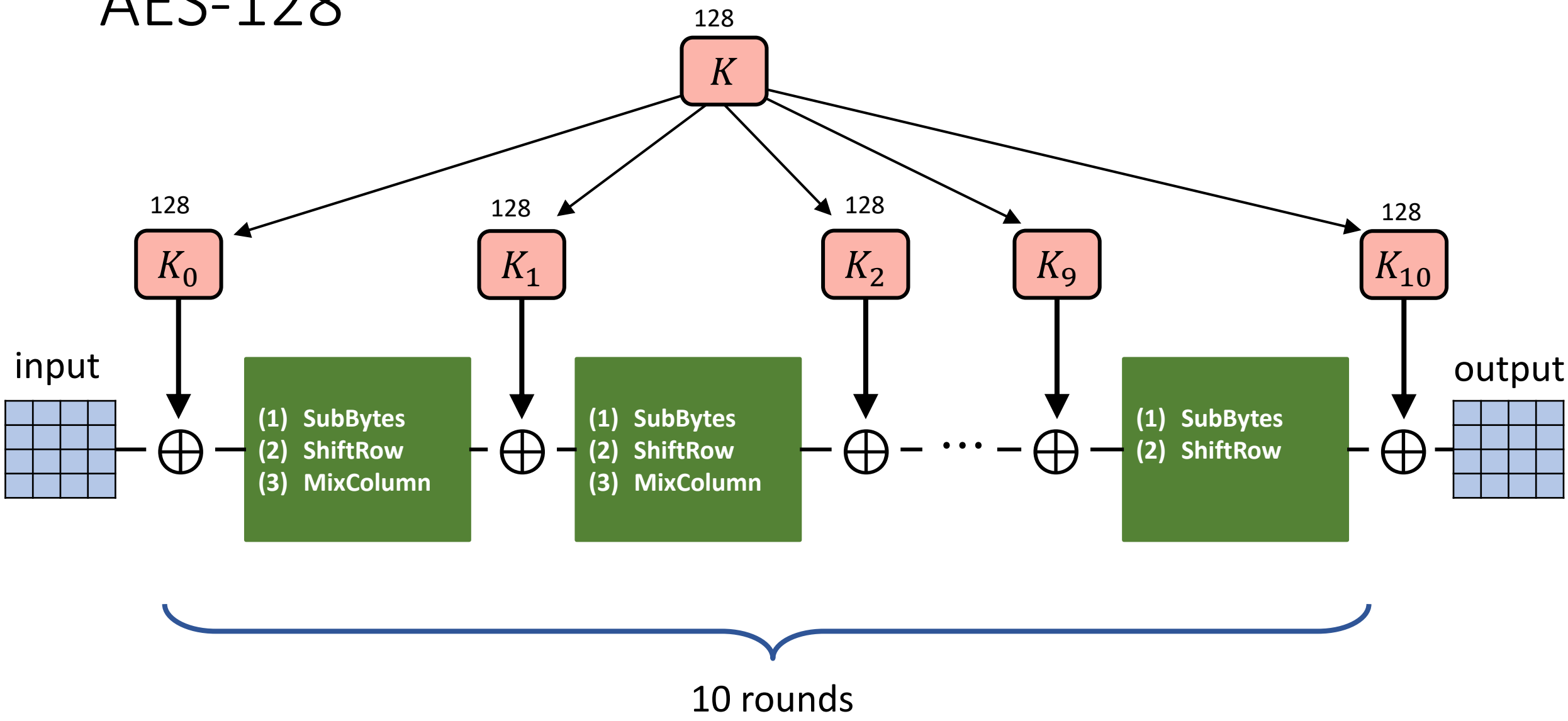
    2. Putaran sebanyak *Nr* – 1 kali. Proses yang dilakukan pada setiap putaran adalah:
        a. *SubBytes*: substitusi *byte* dengan menggunakan tabel substitusi (*S-box*).
        b. *ShiftRows*: pergeseran baris-baris *array state* secara *wrapping*.
        c. *MixColumns*: mengacak data di masing-masing kolom *array state.*
        d. *AddRoundKey*: melakukan XOR antara *state* sekarang *round key*.

    3. *Final round*: proses untuk putaran terakhir:
        a. *SubBytes*
        b. *ShiftRows*
        c. *AddRoundKey*


State
Round key 0
AddRoundKey
putaran awal
SubBytes
ShiftRows
MixColumns
Nr – 1 putaran
Round key Nr – 1
AddRoundKey
SubBytes
ShiftRows
putaran akhir
AddRoundKey
State

Sumber: Håkon Jacobsen, Lecture 2 – Block ciphers, PRFs/PRPs, DES, AES

AES-128

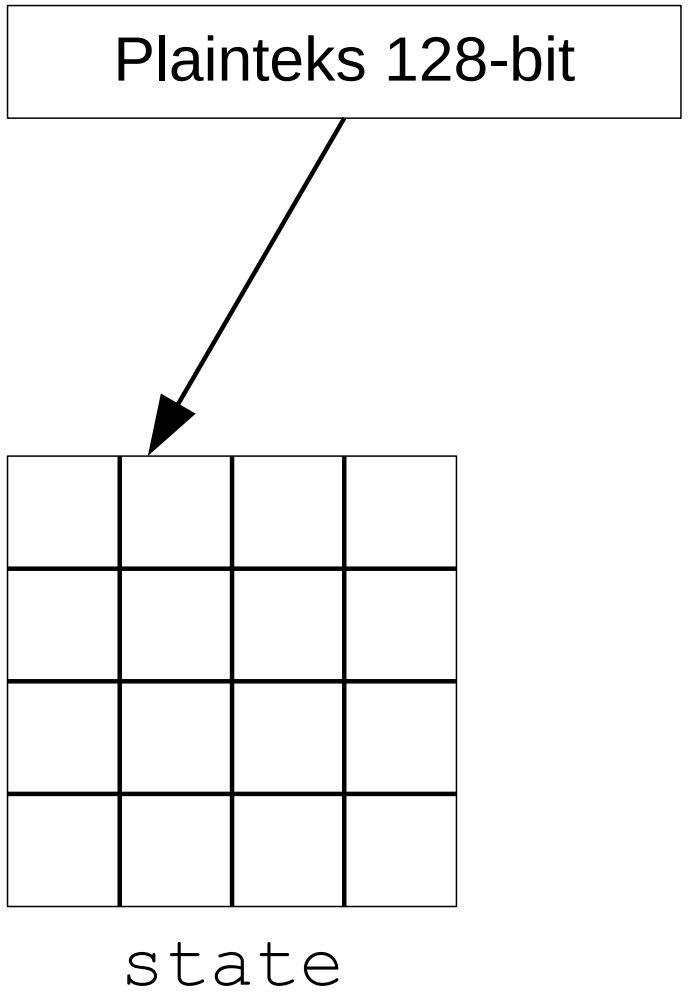


```
#define LENGTH 16            /* Jumlah byte di dalam blok atau kunci */
#define NROWS 4              /* Jumlah baris di dalam state */
#define NCOLS 4              /* Jumlah kolom di dalam state */
#define ROUNDS 10            /* Jumlah putaran */
typedef unsigned char byte;  /* unsigned 8-bit integer */

rijndael (byte plaintext[LENGTH], byte ciphertext[LENGTH],
          byte key[LENGTH])
{
 int r;                     /* pencacah pengulangan */
 byte state[NROWS][NCOLS];  /* state sekarang */
 struct{byte k[NROWS][NCOLS];} rk[ROUNDS + 1];  /* kunci pada setiap putaran */

 KeyExpansion(key, rk);       /* bangkitkan kunci setiap putaran */
 CopyPlaintextToState(state, plaintext);  /* inisialisasi
                                             state sekarang */
 AddRoundKey(state, rk[0]);  /* XOR key ke dalam state */

 for (r = 1; r<= ROUNDS - 1; r++)
 {
  SubBytes(state);         /* substitusi setiap byte dengan S-box */
  ShiftRows(state);        /* rotasikan baris i sejauh i byte */
  MixColumns(state);       /* acak masing-masing kolom */
  AddRoundKey(state, rk[r]);   /* XOR key ke dalam state */
 }
 SubBytes(state);         /* substitusi setiap byte dengan S-box */
 ShiftRows(state);        /* rotasikan baris i sejauh i byte */
 AddRoundKey(state, rk[ROUNDS]);   /* XOR key ke dalam state */

 CopyStateToCiphertext(ciphertext, state);  /* blok cipherteks yang dihasilkan */

}
```

- Selama kalkulasi plainteks menjadi cipherteks, status data sekarang disimpan di dalam matriks dua dimensi, `state`.

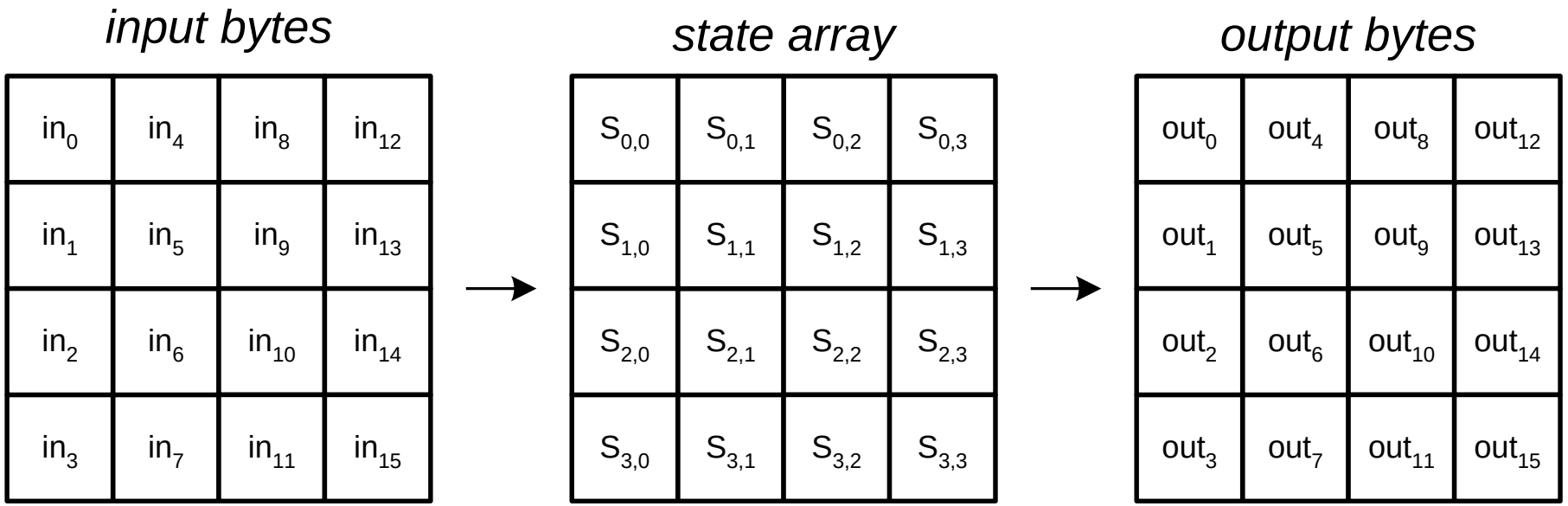
- `state` bertipe *byte* dan berukuran *Nrows* × *Ncols*

- Untuk blok data 128-bit, ukuran `state` adalah 4 × 4, seperti gambar di samping.



- Pada awal enkripsi, 16-*byte* data masukan, in_0, in_1, …, in_{15} disalin ke dalam *array* `state`, direalisasikan oleh fungsi:

```
CopyPlaintextToState(state, plaintext)
```



- Pada akhir enkripsi, state disalin ke dalam `ciphertext`, direalisasikan oleh fungsi:

```
CopyStateToCiphertext(ciphertext, state)
```

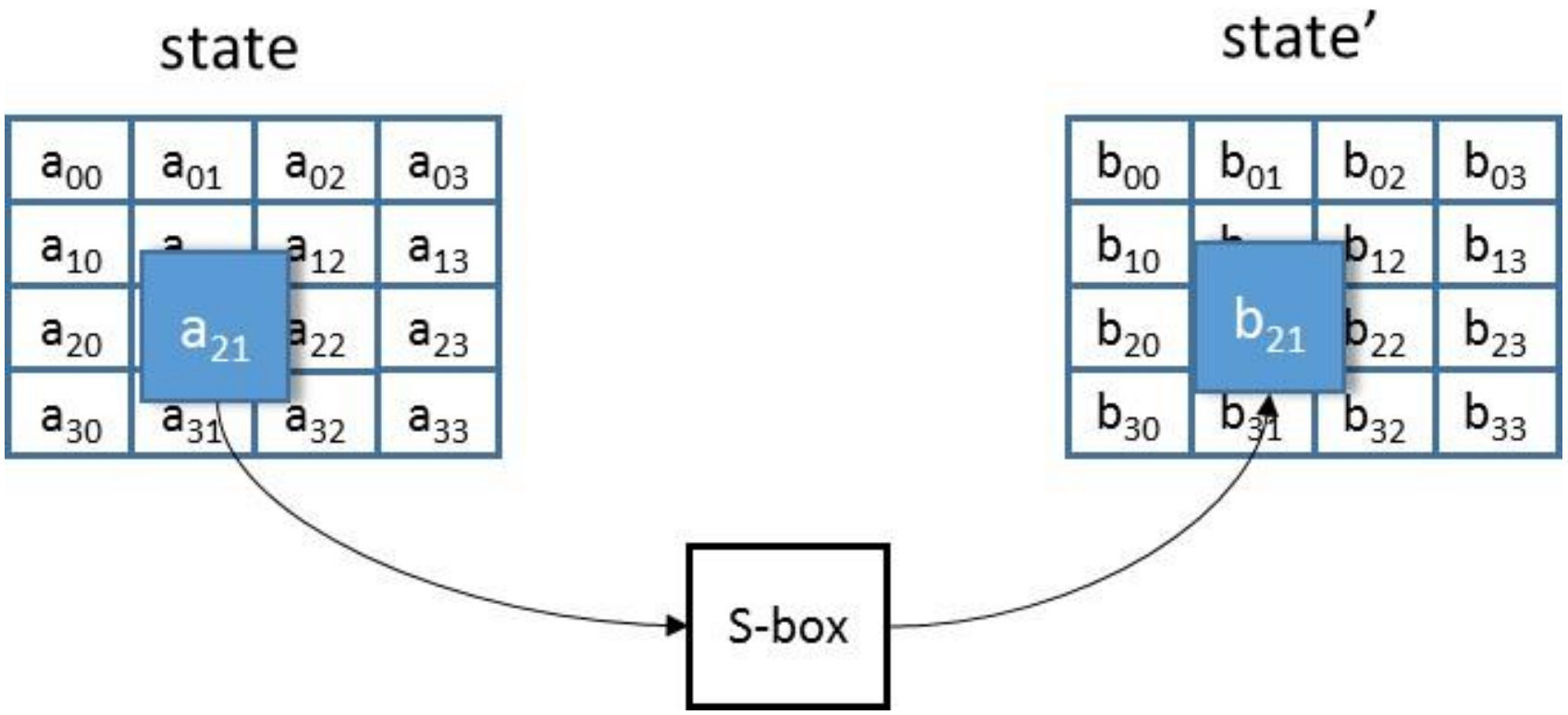
Contoh elemen state dalam notasi HEX:

23	A2	BC	4A
D4	03	97	F3
16	48	CD	50
FF	DA	10	64

Transformasi *SubBytes()*

- *SubBytes()* melakukan operasi substitusi dengan memetakan setiap byte dari *array state* dengan menggunakan *S-box*.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
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



Transformasi *SubBytes*

Contoh:

state

23	A2	BC	4A
D4	03	97	F3
16	48	CD	50
FF	DA	10	64

state'

26	3A	65	D6
48	7B	88	0D
47	52	BD	53
16	57	CA	43

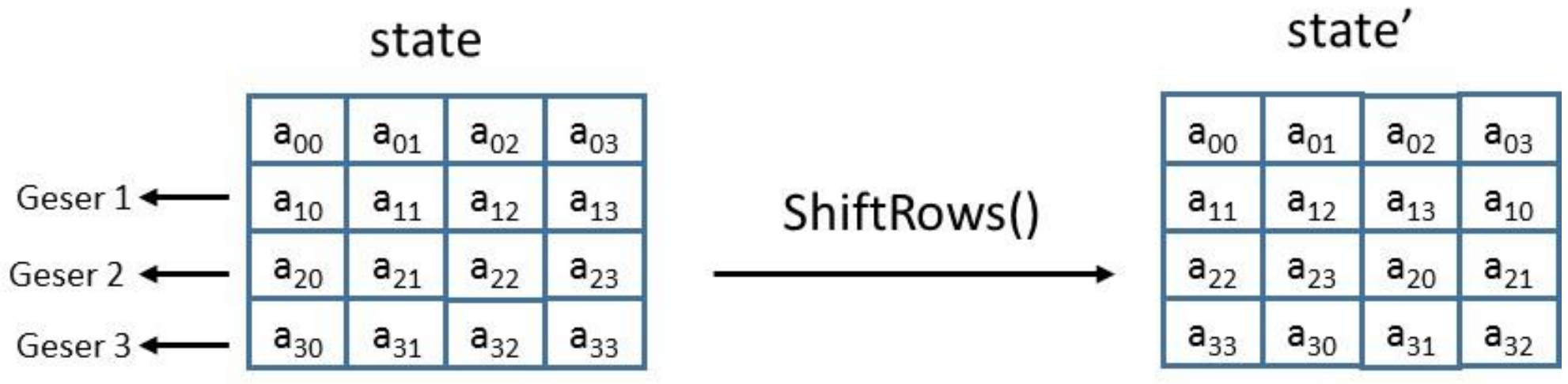
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	63	7C	77	7B	F2	6B	6F	C5	30	01	67	2B	FE	D7	AB	76
1	CA	82	C9	7D	FA	59	47	F0	AD	D4	A2	AF	9C	A4	72	C0
2	B7	FD	93	**26**	36	3F	F7	CC	34	A5	E5	F1	71	D8	31	15
3	04	C7	23	C3	18	96	05	9A	07	12	80	E2	EB	27	B2	75
4	09	83	2C	1A	1B	6E	5A	A0	52	3B	D6	B3	29	E3	2F	84
5	53	D1	00	ED	20	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

Proses substitusi 23 menjadi 26

Transformasi *ShiftRows()*

- Transformasi *ShiftRows()* melakukan operasi permutasi dengan pergeseran secara *wrapping* (siklik) pada 3 baris terakhir *array state*.

- Jumlah pergeseran bergantung pada nilai baris (*r*). Baris *r* = 1 digeser sejauh 1 *byte*, baris *r* = 2 sejauh 2 *byte*, dan baris *r* = 3 sejauh 3 *byte*. Baris *r* = 0 tidak digeser.



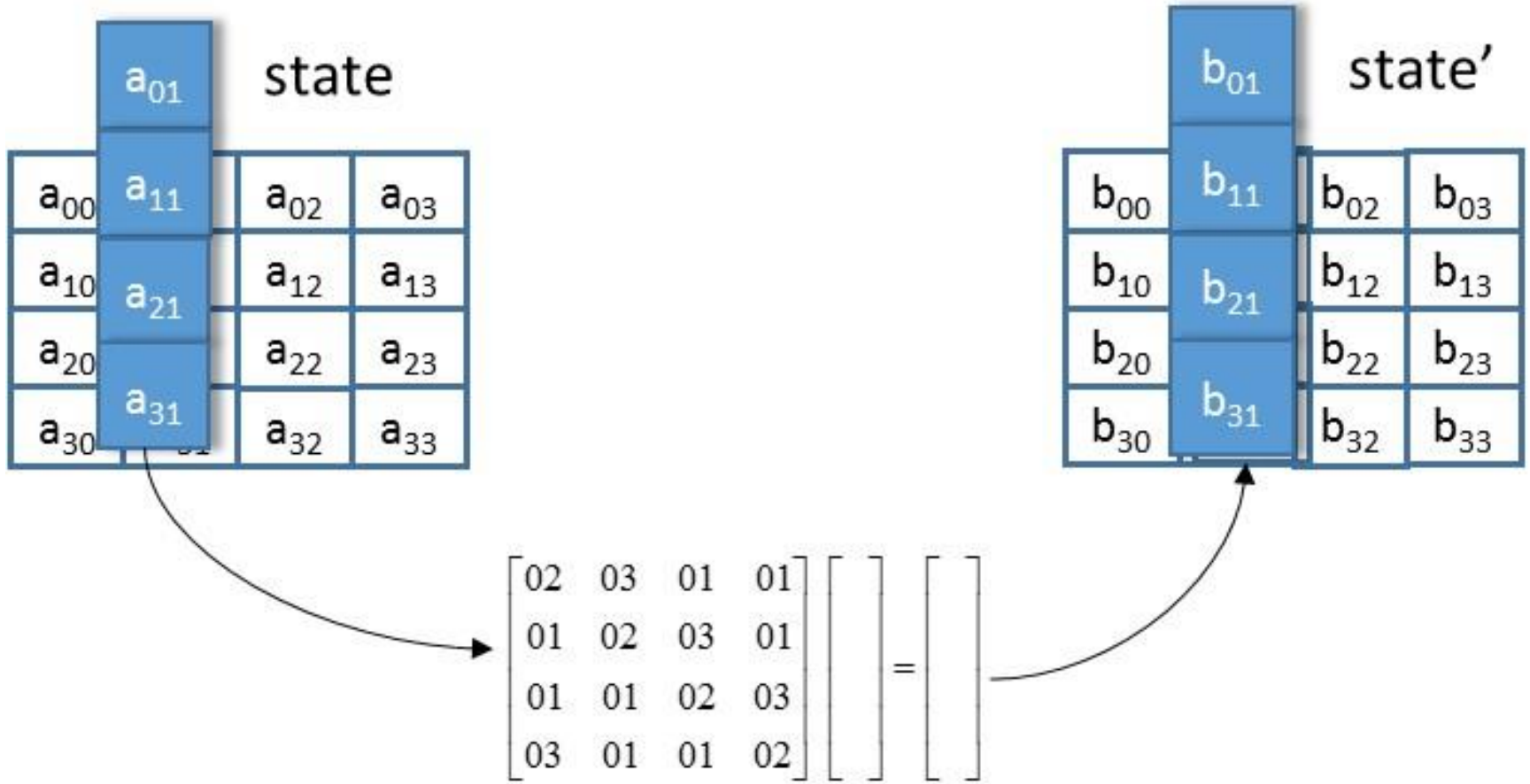
26	3A	65	D6
48	7B	88	0D
47	52	BD	53
16	57	CA	43

26	3A	65	D6
7B	88	0D	48
BD	53	47	52
43	16	57	CA

Transformasi *MixColumns()*

- Transformasi *MixColumns()* mengalikan matriks *state* dengan sebuah matriks tertentu sbb:

$$\begin{bmatrix} 02 & 03 & 01 & 01 \\ 01 & 02 & 03 & 01 \\ 01 & 01 & 02 & 03 \\ 03 & 01 & 01 & 02 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{0,0} & s_{0,1} & s_{0,2} & s_{0,3} \\ s_{1,0} & s_{1,1} & s_{1,2} & s_{1,3} \\ s_{2,0} & s_{2,1} & s_{2,2} & s_{2,3} \\ s_{3,0} & s_{3,1} & s_{3,2} & s_{3,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s'_{0,0} & s'_{0,1} & s'_{0,2} & s'_{0,3} \\ s'_{1,0} & s'_{1,1} & s'_{1,2} & s'_{1,3} \\ s'_{2,0} & s'_{2,1} & s'_{2,2} & s'_{2,3} \\ s'_{3,0} & s'_{3,1} & s'_{3,2} & s'_{3,3} \end{bmatrix}$$


state
a01
a11
a21
a31
a00
a02
a03
a10
a12
a13
a20
a22
a23
a30
a32
a33
state'
b01
b11
b21
b31
b00
b02
b03
b10
b12
b13
b20
b22
b23
b30
b32
b33
02 03 01 01
01 02 03 01
01 01 02 03
03 01 01 02
=

$$s'(x) = a(x) \otimes s(x)$$

$$\begin{bmatrix} s'_{0,c} \\ s'_{1,c} \\ s'_{2,c} \\ s'_{3,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 02 & 03 & 01 & 01 \\ 01 & 02 & 03 & 01 \\ 01 & 01 & 02 & 03 \\ 03 & 01 & 01 & 02 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{0,c} \\ s_{1,c} \\ s_{2,c} \\ s_{3,c} \end{bmatrix}$$

$$s'_{0,c} = (\{02\} \bullet s_{0,c}) \oplus (\{03\} \bullet s_{1,c}) \oplus s_{2,c} \oplus s_{3,c}$$

$$s'_{1,c} = s_{0,c} \oplus (\{02\} \bullet s_{1,c}) \oplus (\{03\} \bullet s_{2,c}) \oplus s_{3,c}$$

$$s'_{2,c} = s_{0,c} \oplus s_{1,c} \oplus (\{02\} \bullet s_{1,c}) \oplus (\{03\} \bullet s_{3,c})$$

$$s'_{3,c} = (\{03\} \bullet s_{0,c}) \oplus s_{0,c} \oplus s_{1,c} \oplus (\{02\} \bullet s_{3,c})$$

Contoh:

$$\begin{bmatrix} 02 & 03 & 01 & 01 \\ 01 & 02 & 03 & 01 \\ 01 & 01 & 02 & 03 \\ 03 & 01 & 01 & 02 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 26 \\ 7B \\ BD \\ 43 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3F \\ 4F \\ F9 \\ 2A \end{bmatrix}$$

$(02 \bullet 26) \oplus (03 \bullet 7B) \oplus (01 \bullet BD) \oplus (01 \bullet 43) = 3F$
$(01 \bullet 26) \oplus (02 \bullet 7B) \oplus (03 \bullet BD) \oplus (01 \bullet 43) = 4F$
$(01 \bullet 26) \oplus (01 \bullet 7B) \oplus (02 \bullet BD) \oplus (03 \bullet 43) = F9$
$(03 \bullet 26) \oplus (01 \bullet 7B) \oplus (01 \bullet BD) \oplus (02 \bullet 43) = 2A$

$(02 \bullet 26) \oplus (03 \bullet 7B) \oplus (01 \bullet BD) \oplus (01 \bullet 43) = 3F$

$(02 \bullet 26) = (0000\ 0010) \times (0010\ 0110)$

$= x \times (x^5 + x^2 + x)$ **mod** $(x^8 + x^4 + x^3 + x + 1)$

$= (x^6 + x^3 + x^2)$ **mod** $(x^8 + x^4 + x^3 + x + 1)$

$= x^6 + x^3 + x^2$

$= (01001100)$

$= 4C$

$(03 \bullet 7B) = (0000\ 0011) \times (0111\ 1011)$

$= (x + 1) \times (x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x + 1)$ **mod** $(x^8 + x^4 + x^3 + x + 1)$

$= ((x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + x^2 + x) + (x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x + 1))$ **mod** $(x^8 + x^4 + x^3 + x + 1)$

$= (x^7 + (1 + 1)x^6 + (1 + 1)x^5 + (1 + 1)x^4 + x^3 + x^2 + (1 + 1)x + 1)$ **mod** $(x^8 + x^4 + x^3 + x + 1)$

$= (x^7 + x^3 + x^2 + 1)$ **mod** $(x^8 + x^4 + x^3 + x + 1)$

$= (x^7 + x^3 + x^2 + 1)$

$= (1000\ 1101) = 8D$

$(01 \bullet BD) = BD = 10111101$

$(01 \bullet 43) = 43 = 01000011$

$(02 \bullet 26) \oplus (03 \bullet 7B) \oplus (01 \bullet BD) \oplus (01 \bullet 43) = 3F$

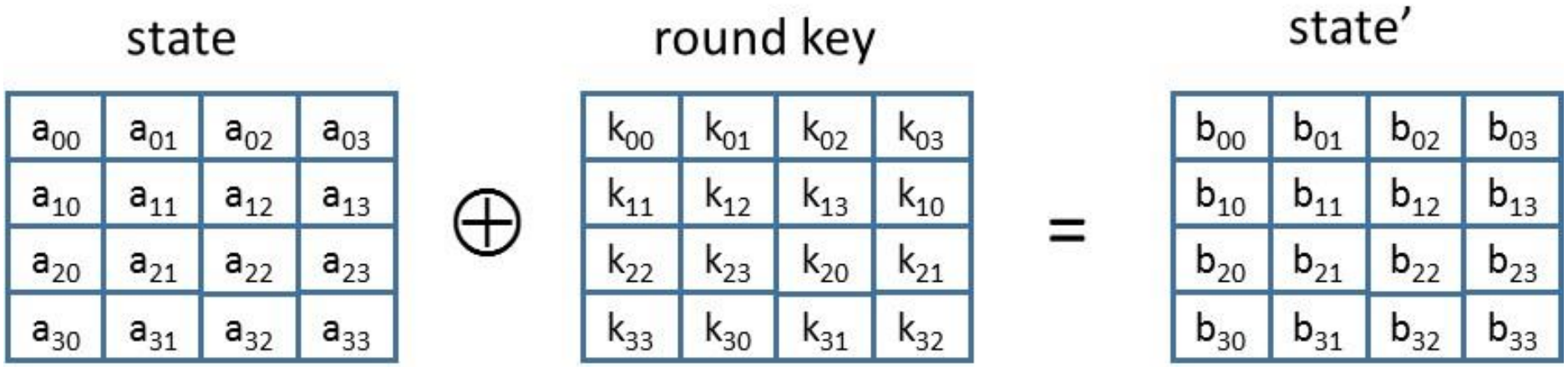
Selanjutnya, XOR-kan semua hasil antara tersebut:

$(02 \bullet 26) = 4C = 0100\ 1100$
$(03 \bullet 7B) = 8D = 1000\ 1101$
$(01 \bullet BD) = BD = 1011\ 1101$
$(01 \bullet 43) = 43 = \underline{0100\ 0011 \oplus}$
$0011\ 1111 = 3F$

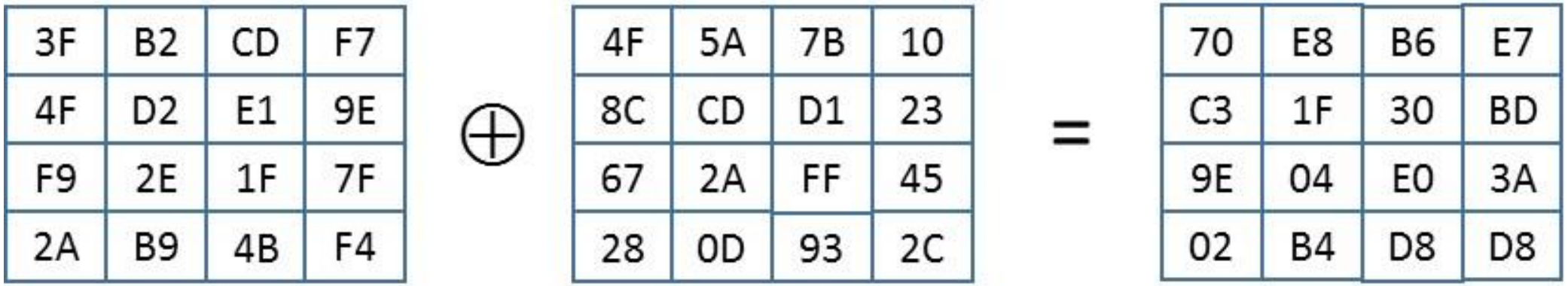
Jadi, $(02 \bullet 26) \oplus (03 \bullet 7B) \oplus (01 \bullet BD) \oplus (01 \bullet 43) = 3F$
Persamaan lainnya diselesaikan dengan cara yang sama.

Transformasi *AddRoundKey()*

- Transformasi ini melakukan operasi XOR antara *round key* dan *state*, dan hasilnya disimpan di *state*.



Contoh:


3F B2 CD F7
4F D2 E1 9E
F9 2E 1F 7F
2A B9 4B F4
⊕
4F 5A 7B 10
8C CD D1 23
67 2A FF 45
28 0D 93 2C
=
70 E8 B6 E7
C3 1F 30 BD
9E 04 E0 3A
02 B4 D8 D8

S-box

Elemen-elemen di dalam *S-box* terlihat seperti diisi secara acak, namun sebenarnya ia dihasilkan dari proses perhitungan sebagai berikut:

1. Inisialisasi *S-box* dengan nilai yang menaik dari baris ke baris. Baris ke-0 diisi dengan nilai 00, 01, 02, …, 0F. Baris ke-1 diisi dengan nilai 10, 11, 12, …, 1F, dan seterusnya untuk baris-baris lain.
2. Untuk setiap nilai pada baris *y* kolom *x*, tentukan balikannya dalam GF(2^8). Nilai 00 dipetakan ke dirinya sendiri. Penjelasan tentang GF(2^8) lihat pada lampiran.
3. Hasil dari langkah 2 dikonversi ke vektor kolom bit $(b_0, b_1, \ldots, b_8)^T$.

4. Kalikan vektor kolom bit $(b_0, b_1, \ldots, b_8)^T$ dengan sebuah matriks *affine* sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} b'_0 \\ b'_1 \\ b'_2 \\ b'_3 \\ b'_4 \\ b'_5 \\ b'_6 \\ b'_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \\ b_7 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

5. Selanjutnya, konversi hasil perhitungan $(b'_0, b'_1, \ldots, b'_8)^T$ ke dalam heksadesimal, menjadi elemen *S-box*(x, y).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
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 di dalam Rijndael

Pembentukan Kunci Putaran

- Setiap putaran di dalam algoritma *Rijndael* menggunakan kunci putaran atau *round key*. Kunci putaran dibangkitkan dari kunci eksternal dari pengguna yang dinamakan *cipher key* dan disimbolkan dengan peubah *key*. Pembangkitan semua kunci putaran dilakukan oleh fungsi *KeyExpansion()*.

- Pembangkitan kunci putaran di dalam Algoritma Rijndael tergolong rumit dan agak sukar diterangkan. Tinjau sebuah larik *key* yang panjangnya 16 *byte* (16 elemen) dan *Nr* = 10 putaran. Sepuluh kunci putaran akan disimpan di dalam larik *rk*. Elemen awal *key* langsung menjadi *rk*[0]. Elemen-elemen kunci lainya akan disimpan di dalam *rk*[1], *rk*[2], …, rk[10].

ExpansionKey()

Algoritma:

1. Salin elemen-elemen *key* ke dalam larik *w*[0], *w*[1], *w*[2], *w*[3]. Larik *w*[0] berisi empat elemen pertama key, *w*[1] berisi empat elemen berikutnya, dan seterusnya.
2. Mulai dari *i* = 4 sampai 43, lakukan:

   a) Simpan *w*[*i*-1] ke dalam peubah *temp*

   b) Jika *i* kelipatan 4, lakukan fungsi *g* berikut:

   - Geser *w*[*i*-1] satu *byte* ke kiri secara sirkuler
   - Lakukan substitusi dengan *S-box* terhadap hasil pergeseran tersebut

- XOR-kan hasilnya dengan *round constant* (*Rcon*) ke *i*/4 (atau *Rcon*[*i*/4]).

- Nilai *Rcon* berbeda-beda untuk setiap *j* = *i*/4, yaitu *Rcon*[*j*] = (*RC*]*j*], 0, 0, 0), dengan *RC*[1]=1, *RC*[*j*] = 2•*RC*[*j*-1], simbol • menyatakan perkalian yang didefinisikan di dalam GF(2^8).

- Nilai *RC*[*j*] di dalam heksadesimal adalah [STA11]: *RC*[1]=01, *RC*[2]=02, *RC*[3]=04, *RC*[4]=08, *RC*[5]=10, *RC*[6]=20, *RC*[7]=40, *RC*[8]=80, *RC*[9]=1B, *RC*[10]=36.

- Simpan hasil fungsi *g* ke dalam peubah *temp*

c) XOR-kan *w*[*i*-4] dengan *temp*

Sebagai contoh, misalkan *key* dalam hekadesimal adalah

$$key = (54, 77, 6F, 20, 4F, 6E, 65, 20, 4E, 69, 6E, 65, 20, 54, 77, 6F)$$

Dari *key* langsung diperoleh *rk*[0] sebagai berikut:

54	4F	4E	20
77	6E	69	54
6F	65	6E	77
20	20	65	6F

Proses di bawah ini hanya menunjukkan pembangkitan *rk*[1]:

1. $w[0] = (54, 77, 6F, 20)$; $w[1] = (4F, 6E, 65, 20)$; $w[2] = (4E, 69, 6E, 65)$; $w[3] = (20, 54, 77, 6F)$
2. Mulai dari $i = 4$:
   a) $temp = w[3]$
   b) $i = 4$ adalah kelipatan 4, maka jalankan fungsi g terhadap $w[3]$:
      - Geser $w[3]$ satu *byte* ke kiri secara sirkuler: $w[3] = (54, 77, 6E, 20)$
      - Substitusi hasil pergeseran tersebut dengan *S-box*: (20, F5, 9F, B7)
      - XOR-kan hasil di atas dengan $Rcon[1] = (01, 00, 00, 00)$, menghasilkan (21, F5, 9F, B7)

      Jadi, $g(w[3]) = (21, F5, 9F, B7)$
   c) $w[4] = w[0] \oplus g(w[3]) = w[0] \oplus g(w[3]) = (75, 82, F0, 97)$

   Untuk $i = 5, 6, 7$:

   $w[5] = w[4] \oplus w[1] = (3A, EC, 96, B7)$,
   $w[6] = w[5] \oplus w[2] = (74, 85, F8, D2)$,
   $w[7] = w[6] \oplus w[3] = (54, D1, 8F, BD)$

Dari proses di atas diperoleh *rk*[1] sebagai berikut:

75	3A	74	54
82	EC	85	D1
F0	96	F8	8F
97	B7	D2	BD

Dekripsi

```
#define LENGTH  16      /* Jumlah byte di dalam blok atau kunci */
#define Nrows    4      /* Jumlah baris di dalam state */
#define Ncols    4      /* Jumlah kolom di dalam state */
#define Nr      10      /* Jumlah putaran */
typedef unsigned char byte; /* unsigned 8-bit integer */

decrypt_rijndael (byte in[LENGTH], byte out[LENGTH], byte key[LENGTH])
{
 int round;           /* pencacah pengulangan */
 byte state[Nrows][Ncols];
 struct{byte k[Nrows][Ncols];} rk[Nr + 1]; /* kunci setiap putaran */

 KeyExpansion(key, rk);    /* bangkitkan kunci setiap putaran */
 CopyInToState(state, in);

 AddRoundKey(state, rk[Nr]);

 for (round = Nr - 1; round >= 1; round--)
 {
   InvShiftRows(state);
   InvSubBytes(state);
   AddRoundKey(state, rk[round]);
   InvMixColumns(state);
 }

 /* putaran terakhir */
 InvShiftRows(state);
 InvSubBytes(state);
 AddRoundKey(state, rk[0]);

 CopyStateToOut(out, state); /* cipherteks */

}
```

InvSubBytes()

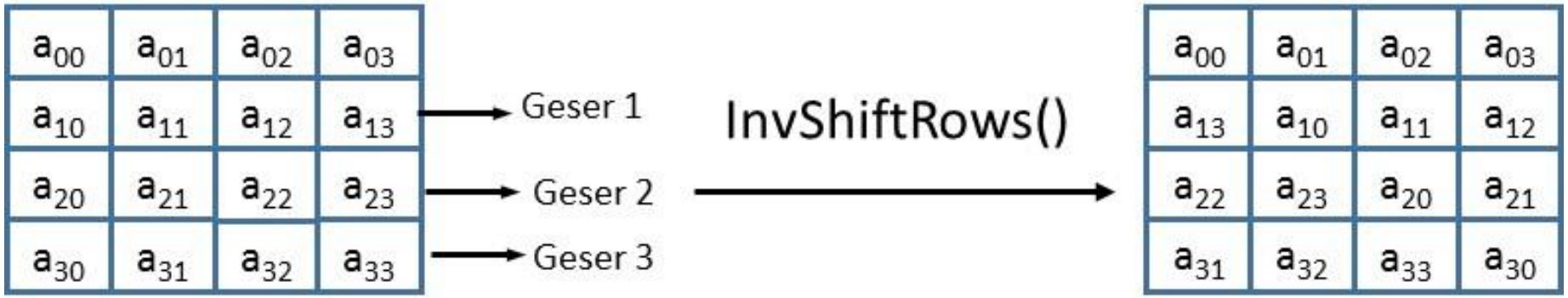
- *InvSubBytes()* sama seperti di dalam *SubBytes()*, hanya saja *S-box* yang digunakan adalah inversi dari *S-box*

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	52	09	6A	D5	30	36	A5	38	BF	40	A3	9E	81	F3	D7	FB
1	7C	E3	39	82	9B	2F	FF	87	34	8E	43	44	C4	DE	E9	CB
2	54	7B	94	32	A6	C2	23	3D	EE	4C	95	0B	42	FA	C3	4E
3	08	2E	A1	66	28	D9	24	B2	76	5B	A2	49	6D	8B	D1	25
4	72	F8	F6	64	86	68	98	16	D4	A4	5C	CC	5D	65	B6	92
5	6C	70	48	50	FD	ED	B9	DA	5E	15	46	57	A7	8D	9D	84
6	90	D8	AB	00	8C	BC	D3	0A	F7	E4	58	05	B8	B3	45	06
7	D0	2C	1E	8F	CA	3F	0F	02	C1	AF	BD	03	01	13	8A	6B
8	3A	91	11	41	4F	67	DC	EA	97	F2	CF	CE	F0	B4	E6	73
9	96	AC	74	22	E7	AD	35	85	E2	F9	37	E8	1C	75	DF	6E
A	47	F1	1A	71	1D	29	C5	89	6F	B7	62	0E	AA	18	BE	1B
B	FC	56	3E	4B	C6	D2	79	20	9A	DB	C0	FE	78	CD	5A	F4
C	1F	DD	A8	33	88	07	C7	31	B1	12	10	59	27	80	EC	5F
D	60	51	7F	A9	19	B5	4A	0D	2D	E5	7A	9F	93	C9	9C	EF
E	A0	E0	3B	4D	AE	2A	F5	B0	C8	EB	B	3C	83	53	99	61
F	17	2B	04	7E	BA	77	D6	26	E1	69	14	63	55	21	0C	7D

Gambar 6.27 Inversi *S-box* di dalam Rijndael

InvShiftRows()

- *InvShiftRows* sama seperti *ShiftRows* namun melakukan pergeseran dalam arah berlawanan (ke kanan) untuk tiap-tiap baris pada tiga baris terakhir di dalam *state*



InvMixColumns()

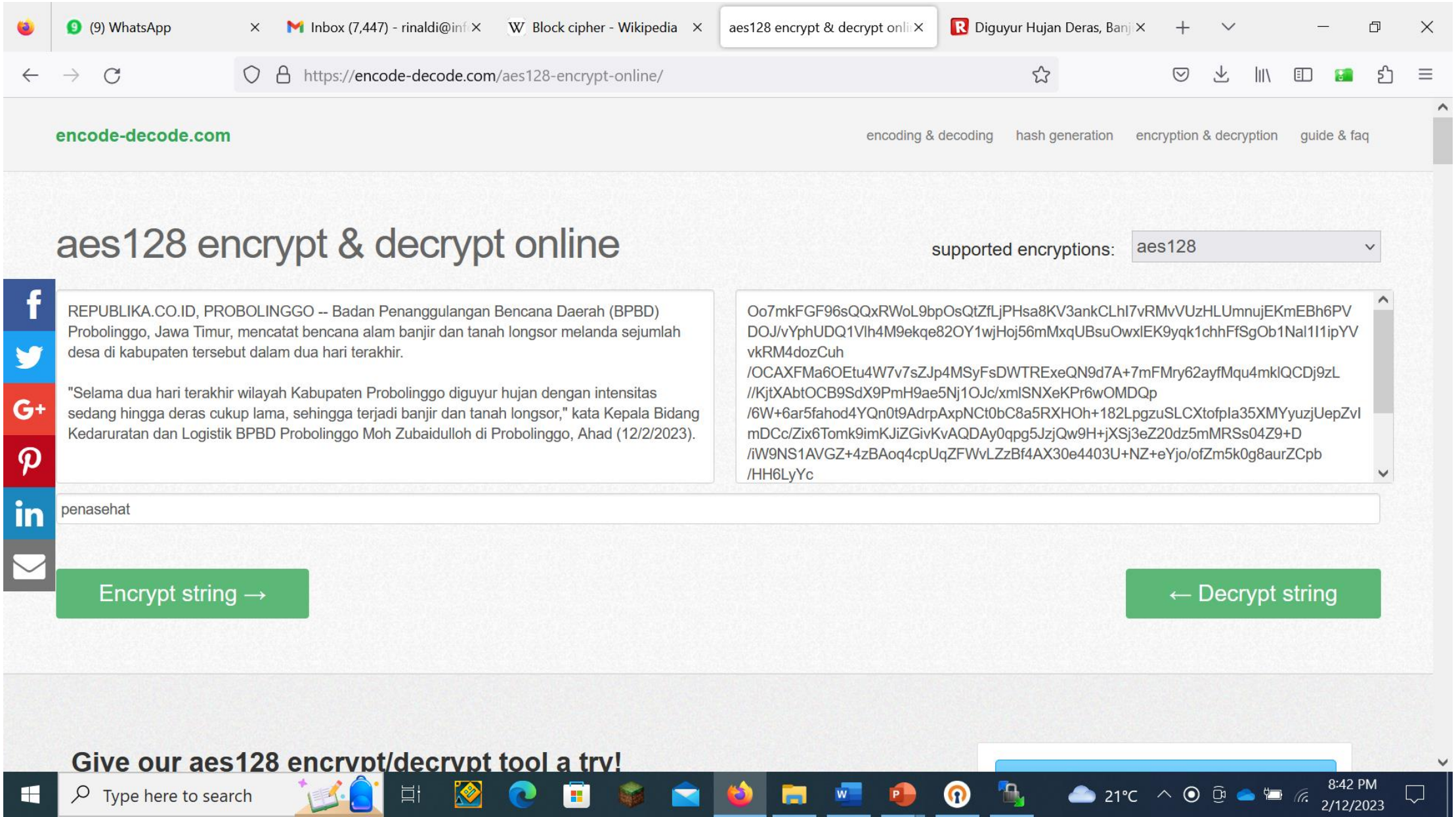
$$\begin{bmatrix} 0E & 0B & 0D & 09 \\ 09 & 0E & 0B & 0D \\ 0D & 09 & 0E & 0B \\ 0B & 0D & 09 & 0E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{0,0} & s_{0,1} & s_{0,2} & s_{0,3} \\ s_{1,0} & s_{1,1} & s_{1,2} & s_{1,3} \\ s_{2,0} & s_{2,1} & s_{2,2} & s_{2,3} \\ s_{3,0} & s_{3,1} & s_{3,2} & s_{3,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s'_{0,0} & s'_{0,1} & s'_{0,2} & s'_{0,3} \\ s'_{1,0} & s'_{1,1} & s'_{1,2} & s'_{1,3} \\ s'_{2,0} & s'_{2,1} & s'_{2,2} & s'_{2,3} \\ s'_{3,0} & s'_{3,1} & s'_{3,2} & s'_{3,3} \end{bmatrix}$$

URL yang terkait dengan AES:

1. AES Homepage, http://www.nist.gov/CryptoToolkit
2. J. Daemen, V. Rijmen, AES Proposal: Rijndael, http://www.esat.kuleuven.ac.be/~rizmen/

Demo online AES

https://encode-decode.com/aes128-encrypt-online/



Program enkripsi-dekripsi AES dengan Python

In [1]:
```
#import library crypto dan base64
from Crypto.Cipher import AES
from Crypto import Random
import base64
```

In [2]:
```
def enkripsi (pesan):
    print("Plainteks: \n", pesan)
    print("Ketikkan kunci (16 karakter):")
    kunci = input()
    iv = Random.new().read(AES.block_size)
    cipher = AES.new (kunci,AES.MODE_CBC,iv)   #defenisikan AES mode CBC

    cipherteks = base64.b64encode (iv + cipher.encrypt(pesan))  #enkripsi pesan

    print("\n")
    print("Cipherteks: \n", cipherteks)     #tampilkan ciphertext
```

In [15]:
```
def dekripsi(pesan):

    print("Cipherteks: \n", pesan)

    print("Ketikkan kunci (16 karakter):")
    kunci = input()
    iv = pesan[:16]
    cipher = AES.new(kunci, AES.MODE_CBC,iv)

    #dekripsi pesan
    plainteks = cipher.decrypt (base64.b64decode(pesan))

    print("\n")

    #tampilkan plainteks
    print ("Pesan setelah didekripsi adalah: \n", plainteks[16:])
```

In [17]:

```
def ProgramEnkripsiDekripsiAES():
    print("-- Enkripsi dan dekripsi pesan dengan AES --")
    print("1: Enkripsi pesan")
    print("2: Dekripsi pesan")

    pilih = input()
    if pilih == '1':
       print("Ketikkan pesan yang akan dienkripsi:")
       pesan = input()
       n = len(pesan)
       if n % 16 != 0:
         pesan = pesan + ' ' * (16 - n % 16)   #padding dengan spasi
       print("Enkripsi pesan...")
       enkripsi(pesan)

    elif pilih == '2':
       print("Ketikkan pesan yang akan didekripsi:")
       pesan = input()
       #pesan= pesan.rjust(32)
       print("Dekripsi pesan...")
       dekripsi(pesan)

    else:
       print("Pilihan salah")
```

Run program (enkripsi):

```
In [6]: ProgramEnkripsiDekripsiAES()
```

```
-- Enkripsi dan dekripsi pesan dengan AES --
1: Enkripsi pesan
2: Dekripsi pesan
1
Ketikkan pesan yang akan dienkripsi:
Hari ini Sabtu 18-2-2023 di Bandung
Enkripsi pesan...
Plainteks:
 Hari ini Sabtu 18-2-2023 di Bandung
Ketikkan kunci (16 karakter):
abcdefghij123456


Cipherteks:
 b'E8Hfql3qMGWfqv028jgvnkIhgDsJLI0teVT0DHkdS3wSnJCgeTB9BWtd5OgtsF0YwcYlQ4IkUFjqUjABJjpH3g=='
```

Run program (dekripsi):

```
In [16]: ProgramEnkripsiDekripsiAES()
```

```
-- Enkripsi dan dekripsi pesan dengan AES --
1: Enkripsi pesan
2: Dekripsi pesan
2
Ketikkan pesan yang akan didekripsi:
E8Hfql3qMGWfqv028jgvnkIhgDsJLI0teVT0DHkdS3wSnJCgeTB9BWtd5OgtsF0YwcYlQ4IkUFjqUjABJjpH3g==
Dekripsi pesan...
Cipherteks:
 E8Hfql3qMGWfqv028jgvnkIhgDsJLI0teVT0DHkdS3wSnJCgeTB9BWtd5OgtsF0YwcYlQ4IkUFjqUjABJjpH3g==
Ketikkan kunci (16 karakter):
abcdefghij123456


Pesan setelah didekripsi adalah:
 b'Hari ini Sabtu 18-2-2023 di Bandung            '
```

Beberapa algoritma kriptografi simetri:

Cipher	Pembuat	Panjang Kunci	Keterangan
Blowfish	Bruce Schneier	1 – 448 bit	*Old and slow*
DES	IBM	56 bit	*Too weak to use now*
IDEA	Massey dan Xuejia	128 bit	*Good, but patented*
RC4	Ronald Rivest	1 – 2048 bit	*Caution: some keys are weak*
RC5	Ronald Rivest	128 – 256 bit	*Good, but patented*
Rijndael	Daemen dan Rijmen	128 – 256 bit	*Best choice*
Serpent	Anderson, Biham, Knudsen	128 – 256 bit	*Very strong*
Triple DES	IBM	168 bit	*Second best choice*
Twofish	Bruce Schneier	128 – 256 bit	*Very strong; widely used*

Lampiran

Galois Field GF(2^m)

- Disebut juga medan berhingga biner.
- GF(2^m) atau $F_2{}^m$ adalah ruang vektor berdimensi *m* pada GF(2). Setiap elemen di dalam GF(2^m) adalah integer dalam representasi biner sepanjang maksimal *m* bit.

- String biner $\alpha_{m-1} \ldots \alpha_1 \alpha_0$, $\alpha_i \in \{0,1\}$, dapat dinyatakan dalam polinom

$$\alpha_{m-1}x^{m-1} + \ldots + \alpha_1 x + \alpha_0$$

- Jadi, setiap a $\in$ GF(2^m) dapat dinyatakan sebagai

$$a = \alpha_{m-1}x^{m-1} + \ldots + \alpha_1 x + \alpha_0$$

- Contoh: 1101 dapat dinyatakan dengan $x^3 + x^2 + 1$

Operasi aritmetika pada GF(2^m)

Misalkan $a = (a_{m-1}..a_1\ a_0)$ dan $b = (b_{m-1}...b_1\ b_0) \in GF(2^m)$

- **Penjumlahan:**

  $a + b = c = (c_{m-1}..c_1\ c_0)$ dimana $c_i = (a_i + b_i) \bmod 2$, $c \in GF(2^m)$

- **Perkalian**: $a \cdot b = c = (c_{m-1}..c_1\ c_0)$ dimana c adalah sisa pembagian polinom $a(x) \cdot b(x)$ dengan *irreducible polynomial* derajat m, $c \in GF(2^m)$

Contoh: Misalkan a = 1101 = $x^3 + x^2 + 1$ dan b = 0110 = $x^2 + x$

a dan b $\in$ GF(2^4)

(i) $a + b = (x^3 + x^2 + 1) + (x^2 + x) = x^3 + 2x^2 + x + 1 \pmod 2$

Bagi tiap koefisien dengan 2, lalu ambil sisanya

$= x^3 + 0x^2 + x + 1$

$= x^3 + x + 1$

Dalam representasi biner:

1101

0110 +

1011 → sama dengan hasil operasi XOR

$\therefore$ a + b = 1011 = a XOR b

(ii) $a \cdot b = (x^3 + x^2 + 1) \cdot (x^2 + x) = x^5 + 2x^4 + x^3 + x^2 + x \pmod 2$

$= x^5 + x^3 + x^2 + x$

Karena m = 4 hasilnya direduksi menjadi derajat < 4 oleh *irreducible polynomial* $x^4 + x + 1$

$x^5 + x^3 + x^2 + x \pmod{f(x)} = (x^4 + x + 1)x + x^5 + x^3 + x^2 + x$

$= 2x^5 + x^3 + 2x^2 + 2x \pmod 2$

$= x^3$

$\therefore\ a \cdot b = 1000$