

# $\text{Mn}_{1.28}\text{Fe}_{0.67}\text{P}_{0.48}\text{Si}_x$ материалын соронзон болон соронзонкалорик шинж чанарын судлагаа

Н.Төвжаргал<sup>1\*</sup>, О.Аз-Их<sup>1</sup>, Хашчулуун<sup>2</sup>, О.Төгс<sup>2</sup>, Ж.Даваасамбуу<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Монгол Улсын Их Сургууль, Шинжлэх ухааны сургуулийн

Физикийн тэнхим, Улаанбаатар хот 210646, Монгол улс

<sup>2</sup>Функционал материалын физик, химийн төв лаборатори,

Өвөр Монголын багшийн их сургууль, Хөх хот, БНХАУ

Бид энэ ажлаар  $\text{Mn}_{1.28}\text{Fe}_{0.67}\text{P}_{0.48}\text{Si}_x$  материалын соронзон болон соронзонкалорик шинж чанарыг Si-ийн концентрацаас хамааруулан судлав. Хатуу төлөвийн урвалын арга ашиглан гаргаж авсан  $\text{Mn}_{1.28}\text{Fe}_{0.67}\text{P}_{0.48}\text{Si}_x$  ( $x=0.520, 0.525, 0.530, 0.535, 0.540, 0.555$ ) дээжүүдийн соронзон мэдрэх чадвар, температурын хамаарлыг судалж материалын соронзон фазын шилжилтийн Кюри температур, Si-ийн концентрацаас хэрхэн хамаарч байгааг үзүүлэв. Мөн дифференциал сканнин колориметр (DSC) ашиглан  $\text{Mn}_{1.28}\text{Fe}_{0.67}\text{P}_{0.48}\text{Si}_x$  ферросоронзонгоос парасоронзон төлөвт фазын шилжилт хийхдээ шингээх энерги, Si-ийн концентрацаас хэрхэн хамаарч байгааг судлав. Туршилтын үр дүнгээс үзэхэд дээжний соронзон болон соронзонкалорик шинж чанар цахиурын агуулгаас хүчтэй хамаарч байна.

PACS numbers: 75.60.Ej, 75.30.Kz, 75.30.Sg, 75.40.Cx

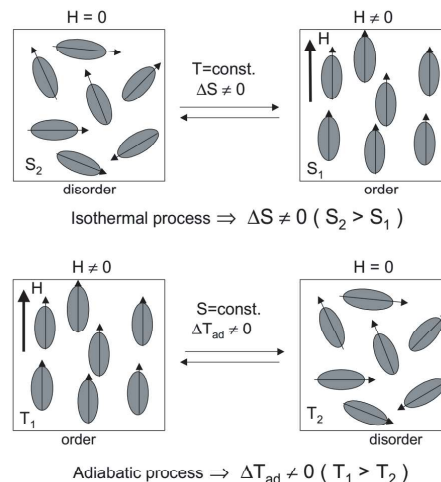
## I. Удиртгал

Сүүлийн жилүүдэд тасалгааны температурын мужид ажилладаг соронзон хөргүүрт ашиглах материалын судалгаа ихээхэн сонирхол татаж байна[1–3]. Соронзон хөргүүр нь соронзон материалыг гаднын соронзон оронд оруулахад халах эсвэл хөрөх үзэгдэл буюу соронзон калорик эффект (МКЭ)-ээр ажилладаг. Соронзон материалыг гаднын соронзон орноор үйлчлэхэд уг материалд адиабат температурын өөрчлөлт ( $\Delta T_{ad}$ ) эсвэл изотерм соронзон-энтропын өөрчлөлт  $-\Delta S_m$  үүсэх үзэгдлийг соронзон калорик эффект гэдэг[4]. Энэ эффектийг мөн адиабат диасоронзжилт гэж бас нэрлэдэг[5, 6] бөгөөд 1881 онд Warburg анх төмөр дээр ажиглан нээж[7], Debay болон Giaque анх тайлбарлаж, амжилттай хэрэглэсэн байдаг[8, 9]. Энэ үзэгдлийн орчин үеийн хамгийн их сонирхон судлагдаж байгаа хэрэглээний салбар бол тасалгааны температураас шингэн гели, устөрөгчийн температурын мужид ажиллах соронзон хөргүүрийн альтернатив технологийн судалгаа юм. Энэ төрлийн хөргүүр нь уламжлалт хөргүүрийн системтэй харьцуулахад байгаль орчинд ээлтэй, энергийн үр ашиг өндөртэй болох нь тогтоогдоод байна[10, 11].

## Соронзон калорик эффектийн онолын үндэс

Соронзон калорик эффектийн үүслийг нэг талаас системийн соронзжилт болон соронзон орныг хувьсгахад температур болон энтропи өөрчлөгддөгтэй холбоотойгоор термодинамик ашиг-

лан тайлбарладаг. Бүх соронзон материалууд МКЭ-ийг үзүүлдэг бөгөөд эффектийн эрчим нь материалын шинж чанараас хамаарна.



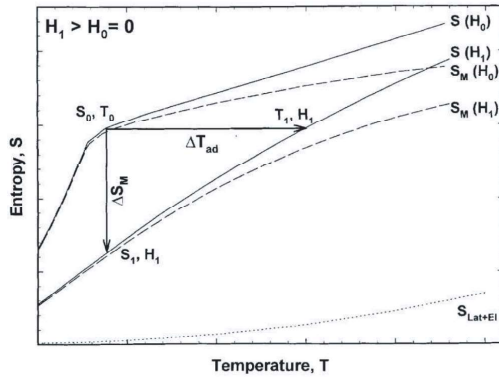
Зураг 1: Зурагт соронзон системд гаднын соронзон орноор үйлчлэх болон салгах үе дэх соронзон калорик эффектийн хоёр үндсэн процессыг үзүүлэв. Энд изотерм процесс нь энтропын өөрчлөлтийг дагуулах бол адиабат процесс нь температурын өөрчлөлтийн шалтгаан болно.

\*E-mail: tuvjargal@num.edu.mn

шахах процесстэй (даралтын үйлчлэлээр системийн энтропи буурна) ижил ойлголт бол дараагийн хийн адиабат тэлэлт (тогтмол энтропитайгаар даралт буурахад температур дагаад буурна) нь адиабат соронзгүйжүүлэхтэй (гаднын соронзон орныг салгасны дараа системийн нийт энтропи тогтмол болж хадгалагдах бөгөөд температур буурсны улмаас соронзон энтропи мөн буурна) эквивалент юм. Ферросоронзон материалын энтропийн утга нь тогтмол даралтад соронзон орон  $H$ , температур  $T$ -ээс хамаарах ба дурын хатуу материалын хувьд нийт системийн энтропи нь торын ( $S_{lat}$ ), электроны ( $S_{elec}$ ) болон соронзон ( $S_m$ ) энтропийн гишүүдээс бүрдэнэ.

$$S(T, H) = S_m(T, H) + S_{lat}(T, H) + S_{elec}(T, H). \quad (1)$$

Зураг.2-г ферросоронзон материалын энтропи Кюри температур ( $T_C$ )-ийн орчим температураас хэрхэн хамаарахыг үзүүлэв. Энд нийт энтропийг гаднын соронзон оронтой ( $H_1$ ), оронгүй ( $H_0$ ) мөн соронзон энтропийг гаднын соронзон оронтой ( $H_1$ ), оронгүй ( $H_0$ ) үед дүрслэн үзүүлэв.



Зураг 2: Соронзон калорик эффектийн  $S$ - $T$  диаграммыг үзүүлэв. Үргэлжилсэн шугамууд нь соронзон оронтой ( $H_1 > 0$ ), оронгүй ( $H_0 = 0$ ) үе дэх нийт энтропи, цэгээр электрон болон торын энтропийг, тасархай шугамаар соронзон оронтой ( $H_1 > 0$ ), оронгүй ( $H_0 = 0$ ) үе дэх нийт соронзон энтропийг дүрслэн үзүүлэв. Хэвтэй сумтай шугамаар  $\Delta T_{ad}$ , босоо сумтай шугамаар  $\Delta S_m$ -ийн  $H_0$ -оос  $H_1$ -ийн хоорондох өөрчлөлтүүдийг үзүүлэв.

Диаграммд үзүүлсэн хоёр холбоотой процессоос соронзон калорик эффектийн термодинамикийг дараах байдлаар ойлгох боломжтой: Үүнд

- Адиабатаар соронзон орон үйлчлэх (ө.х нийт энтропи тогтмол байх) үед буцах процесс байх ба соронзон энтропи буурах боловч системийн нийт энтропи өөрчлөгдөхгүй, температур нэмэгдэнэ.

$$S(T_0, H_0) = S(T_1, H_1). \quad (2)$$

Энэ адиабат температурын ихсэлт нь  $S(T, H)$  функцуудын хоорондох изентропик ялгавар мэт харагдах бөгөөд энэ нь материалын МКЭ-ийн хэмжилтэд,

$$\Delta T_{ad} = T_1 - T_0$$

байна.

-Изотермээр соронзон орон үйлчлэх ( $T$  тогтмол) үед нийт энтропи буурах бөгөөд дагаад соронзон энтропи ч буурна. Иймээс энтропийн өөрчлөлт нь дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ.

$$\Delta S_m = S(T_0, H_0) - S(T_0, H_1). \quad (3)$$

Адиабат температурын өөрчлөлт  $\Delta T_{ad}$ , изотерм соронзон энтропийн өөрчлөлт  $\Delta S_m$  нь хоёулаа МКЭ-ийг тодорхойлох хэмжигдэхүүнүүд юм. Эдгээр 2 хэмжигдэхүүн нь анхны температур  $T_0$ , соронзон орны өөрчлөлт  $\Delta H = H_1 - H_0$ -оос хамаарна.

Хэрэв гаднын орныг ихэсгэхэд соронзон эрэмбэ нэмэгдэнэ (ө.х соронзон энтропи буурна), дараа нь  $\Delta T_{ad}(T, \Delta H)$  нь эерэг болж соронзон материал халж,  $\Delta S_m(T, \Delta H)$  нь сөрөг болох нь шууд харагдаж байна. Гэвч соронзон орон бууруулбал соронзон эрэмбэ буурах ба  $\Delta T_{ad}(T, -\Delta H)$  нь сөрөг болж  $\Delta S_m(T, -\Delta H)$  нь эерэг болж соронзон материал хөрч эхэлнэ. Соронзон орон  $H$ , материалын соронзжилт  $M$  болон температур  $T$ -ийн хоорондох хамаарал нь МКЭ-ийг тодорхойлох хэмжигдэхүүн  $\Delta T_{ad}(T, \Delta H)$ ,  $\Delta S_m(T, \Delta H)$  -ийг Максвеллийн хамаарлаас [12] гаргах боломж олгоно.

$$\left( \frac{\partial S(T, H)}{\partial H} \right)_T = \left( \frac{\partial M(T, H)}{\partial T} \right)_H. \quad (4)$$

Тэгш.4 -ийг изотерм (эсвэл изобар) процессын хувьд интегралчилбал,

$$\Delta S_m(T, \Delta H) = \int_{H_1}^{H_2} \left( \frac{\partial M(T, H)}{\partial T} \right)_H dH, \quad (5)$$

болно. Энэ тэгшитгэл нь соронзон энтропийн өөрчлөлт тогтмол соронзон оронд материалын соронзжилтоос температураар авсан уламжлалаас соронзон орны өөрчлөлтөөр авсан интегралтай тэнцүү болохыг илэрхийлнэ. Энэ нь дараах термодинамик илэрхийлэлтэй холбоотой[12]:

$$\left( \frac{\partial T}{\partial H} \right)_S = - \left( \frac{\partial S}{\partial H} \right)_T \left( \frac{\partial T}{\partial S} \right)_H, \quad (6)$$

$$C_H = T \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_H. \quad (7)$$

Энд  $C_H$  нь тогтмол орон дахь дулаан багтаамж ба тэгш.4 дэх температурын өөрчлөлтийг хязгааргүй бага гэж үзээд бичвэл:

$$dT_{ad} = - \left( \frac{T}{C(T, H)} \right)_H \left( \frac{\partial M(T, H)}{\partial T} \right)_H dH. \quad (8)$$

Энэ тэгшитгэлийг интегралчлаад соронзон калорик эффектийг тодорхойлох илэрхийллийг олбол:

$$\Delta T_{ad} = - \int_{H_1}^{H_2} \left( \frac{T}{C(T, H)} \right)_H \left( \frac{\partial M(T, H)}{\partial T} \right)_H dH. \quad (9)$$

Тэгш.5 болон тэгш.9 -д анализ хийснээр соронзон материал дахь МКЭ-ийн талаарх зарим мэдээллийг авч болно: Үүнд:

1. Парасоронзон болон хялбар ферросоронзон материалын тогтмол соронзон орон дахь соронзжилт нь температурыг нэмэгдүүлэхэд буурдаг байна, ө.х  $(\partial M / \partial T)_H < 0$ . Ингэснээр  $\Delta T_{ad}(T, \Delta H)$  эерэг болох ба эерэг орны өөрчлөлтийн  $(\Delta H > 0)$  хувьд  $\Delta S_m(T, \Delta H)$  нь сөрөг болно.
2. Ферросоронзон материалд, соронзжилтоос температураар авсан уламжлалын абсолют утга  $|(\partial M / \partial T)_H|$  нь  $T_C$  максимум утгад харгалзах ба  $|\Delta S_m(T, \Delta H)|$  нь  $T = T_C$  үед шик үзүүлнэ.
3. Хэдийгээр тэгш.9-аас энэ шууд харагдахгүй ч тогтмол орон дахь дулаан багтаамж нь ферросоронзон материалд  $T_C, \Delta T_{ad}(T, \Delta H)$  -ийн орчим аномали байдлаар  $\Delta H$  тэгрүү тэмүүлж байх үед Кюри температурт харгалзана[13].
4. Дулаан багтаамж бага,  $T$  их үед  $|\Delta S_m(T, \Delta H)|$  болон  $\Delta T_{ad}(T, \Delta H)$  -ийн утгууд ижилхэн ихэснэ.
5. Парасоронзон материалд,  $\Delta T_{ad}(T, \Delta H)$  -ийн утга нь тодорхой температураас абсолют тэг хүртэл утгатай, иймээс  $|(\partial M / \partial T)_H|$  нь бага байна. Зөвхөн дулаан багтаамж нь маш бага ( $|(\partial M / \partial T)_H|$ -тэй ижил эрэмбэтэй) үед  $\Delta T_{ad}(T, \Delta H)$  -ийн холбогдох утгыг олж чадна. Өндөр температурт  $\Delta T_{ad}(T, \Delta H)$  -ийн утга нэлээд том утга гарах бөгөөд ингэхийн тулд бидэнд аяндаа нэгцэрдэг хатуу бие хэрэгтэй.

Тасалгааны температурт соронзон калорик эффект үзүүлж нэгдүгээр эрэмбийн соронзон фазын шилжилт хийдэг материалууд  $Gd_5(Ge_{1-x}Si_x)_4$ ,  $La(Fe_{1-x}Si_x)_{13}$  болон эдгээртэй холбоотой нэгдлүүд болох  $MnAs_{1-x}Sb_x$ ,  $MnFeP_{1-x}$ ,  $MnCoGeB_x$

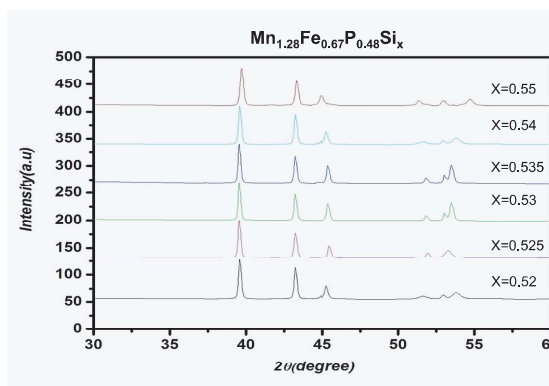
дээр гол судалгаанууд төвлөрч байна[14]. Эдгээр материалууд нь парасоронзон төлөвөөс ферросоронзон төлөвт соронзон фазын шилжилт хийхдээ ойролцоо  $\Delta S_m$  үзүүлдэг. Түүнчлэн  $MnFe(P, As)$  материал нь хүчтэй МКЭ-т үзүүлдэг болохыг нээсэн бөгөөд As-ийг өөр хоргүй элементээр орлуулах судалгаа эрчимтэй хийгдэж байна[15, 16]. Бид энэ ажлаар  $MnFe(P, As)$  нэгдэлд As-ийг Si-ээр орлуулсан нэг тухайн тохиолдол болох  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_x$  материалын соронзон болон соронзонкалорик шинж чанарыг Si-ийн концентрацаас хамааруулан судлах зорилготой.

## II. Туршилт

$Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_x$  ( $x=0.520, 0.525, 0.530, 0.535, 0.540, 0.555$ ) хайлшуудыг БНХАУ-ийн ӨМӨЗО-ний Багшийн их сургуулийн Соронзон материалын физик химийн лабораторид хатуу төлөвийн урвалын арга болон өндөр энергийн валлмиллингийн аргаар синтезэд гарган авсан. Дээжний цэвэршлийг  $Cu K\alpha$  цацаргалт бүхий Philips PW1830 рентген дифрактометр ашиглан тасалгааны температурт хэмжсэн. Соронзжилтийг VSM (Vibrating sample magnetometer) төрлийн LakeShore 7407 ашиглан хэмжсэн бөгөөд энэ нь 1.48 Т хүртэлх соронзон оронд шууд аднабат температурын өөрчлөлтийг хэмжих замаар материалын соронзон болон соронзон калорик шинж чанарыг тодорхойлох төхөөрөмж юм. Энэ хэмжилтээс материалын соронзон фазын шилжилтийн Кюри температур ( $T_C$ ), соронзон гистерезисийн өргөн ( $\Delta T_{his}$ ) зэргийг тодорхойлох боломжтой.

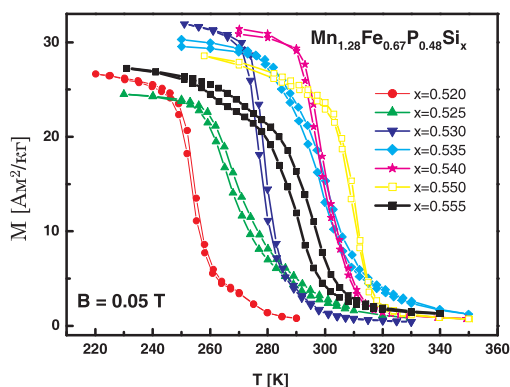
Соронзон калорик материалын хувьд соронзон фазын шилжилт хийхэд тодорхой хэмжээний дулаан ялгаруулах эсвэл шингээх боломжтой. Хувийн дулаан багтаамжийг судлах нь фазын шилжилтийн үеийн дулааны эффектийг тайлбарлахад чухал ач холбогдолтой. Гэвч, материалын нэгдүгээр эрэмбийн фазын шилжилтийн хувийн дулааныг уламжлалт аргаар хэмжих нь маш хэцүү. Иймээс бид  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_x$  нэгдлийн хувийн дулаан багтаамжийг дифференциал сканин калориметр (DCS) ашиглан хэмжих болно. Энэ туршилтад NETZSCH DSC 200F3 төхөөрөмж ашиглан  $-30^\circ C$  -ээс  $110^\circ C$  температурын мужид 5K/мин хурдтайгаар хэмжиж судалсан. Эндээс бид соронзон фазын шилжилтийн дүнд үүсэж байгаа дулааны урсгалын хэмжээг тодорхойлох боломжтой.

## III. Үр дүн



Зураг 3:  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_x$  дээжүүдийн рентген дифракцын спектр

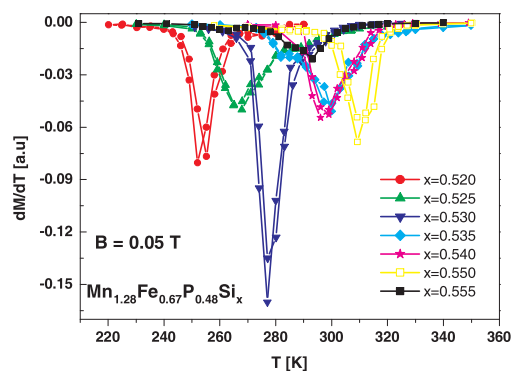
Зураг. 3 -д  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_x$  ( $x=0.520, 0.525, 0.530, 0.535, 0.540, 0.555$ ) хайлшуудын рентген дифракцын спектрийг үзүүлэв. Эндээс үзэхэд дээж маш сайн цэвэршилтэй болох нь харагдаж байна. Энд  $2\theta = 52^\circ - 55^\circ$  -ийн хооронд үүсэж байгаа пикийн эрчмийн өөрчлөлт нь Si-ийн агуулгаас үүсч байгаа өөрчлөлт болно.



Зураг 4:  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_x$  материалын соронзон момент, температурын хамаарал

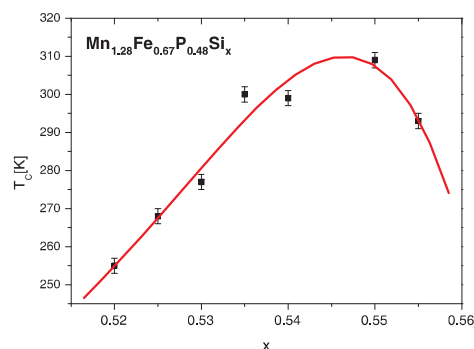
Зураг. 4 -д  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_x$  ( $x=0.520, 0.525, 0.530, 0.535, 0.540, 0.555$ ) дээжүүдийн соронзон мэдрэх чадвар, температурын хамаарлыг  $T = 0.05T$  соронзон оронд халаах болон хөргөх замаар хэмжсэн туршилтын үр дүнг үзүүлэв.

Зураг. 5-д дээжийн соронзон фазын шилжилт хийх Кюри температур  $T_C$  тодорхойлох зорилгоор  $\partial M/\partial T$ , температурын хамаарлыг тооцоолсныг үзүүлэв. Эндээс материалын соронзон фазын шилжилтийн Кюри темпемператур, Si-ийн концентрацаас хэрхэн хамаарч байгааг тогтоох, мөн



Зураг 5:  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_x$  материалын  $dM/dT$ , температурын хамаарал

соронзон гистерезисийн өргөнийг олох боломжтой.



Зураг 6:  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_x$  материалын Кюри температур, Si-ийн агуулгын хамаарал

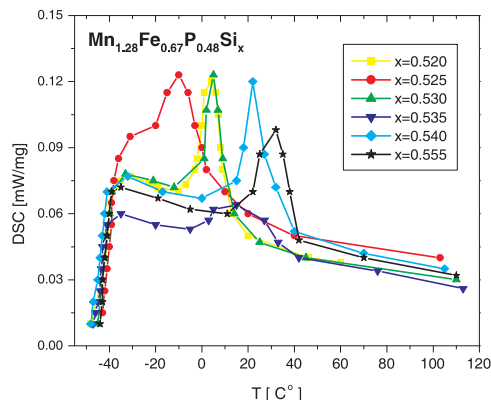
Зураг.6 -д  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_x$  материалын Кюри температур, Si-ийн агуулгаас хэрхэн хамаарч байгааг үзүүлэв. Дээжийн хувьд соронзон фазын шилжилт хийх Кюри температур, цахиурын концентрацаас хамааран шилжиж байна. Энэ шилжилт нь тасалгааны температурын орчимд явагдаж байгаа нь соронзон хөргөлтийн системд ашиглаж болохуйц материалууд болохыг харуулж байна.  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_x$  ( $x=0.520, 0.525, 0.530, 0.535, 0.540, 0.555$ ) дээжүүдийн Кюри температур болон соронзон гистерезисийн өргөнийг тодорхойлсон үр дүнг хүснэгт.1-д үзүүлэв.

$MnFe(P,Si)$  нэгдлийн хувьд Fe, Mn, P болон Si атомууд нь 3f, 3g, 1b, 2c төлөвүүд дээр суух бөгөөд Mn-Fe холбоосны орчин солилцолын харилцан үйлчлэл нь Fe-Fe болон Mn-Mn хосуудын харилцан үйлчлэлээс хүчтэй байдаг. Mn/Fe харьцаа өндөртэй нэгдэлд Mn атомууд нь 3f төлөв дээр суух эрмэлзэлтэй байна[17]. Энэ бүхнээс шалтгаалан материалын Кюри температур шилжиж байгаа болно. Зураг.6 -ээс үзэхэд Кюри тем-

| № | Дээж                                   | $T_c(K)$ | $dT_{his}(K)$ |
|---|----------------------------------------|----------|---------------|
| 1 | $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_{0.520}$ | 255      | 1.5           |
| 2 | $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_{0.525}$ | 268      | 2.5           |
| 3 | $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_{0.530}$ | 277      | 2             |
| 4 | $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_{0.535}$ | 300      | 2.7           |
| 5 | $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_{0.540}$ | 299      | 2             |
| 6 | $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_{0.550}$ | 309      | 2             |
| 7 | $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_{0.555}$ | 293      | 4             |

Хүснэгт I: Кюрийн температур ( $T_c$ ) болон Гистерезисийн өргөн ( $dT_{his}$ ) тооцоолсон үр дүн.

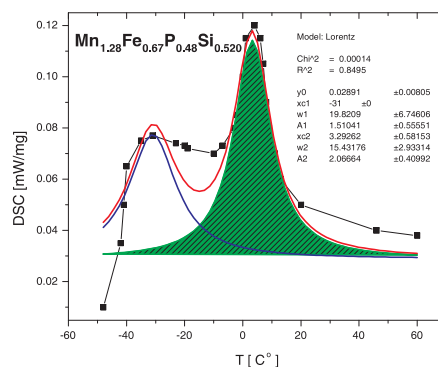
ператур Si-ийн агуулга нэмэгдэхэд бууж байснаа  $x = 0.555$  эргээд буурч байгаа нь энэ өөрчлөлтөд P/Si-ийн харьцаа нөлөөлж байгааг харуулж байна. Эндээс  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_x$  нэгдэл дэх Si-ийн агуулгыг өөрчлөх замаар материалын Кюри температур болон дулааны гистерезисийг өөрчлөж болох нь харагдаж байна.



Зураг 7:  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_x$  материалын дулааны урсгал, температурын хамаарал

Зураг.7-д  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_x$  ( $x=0.520, 0.525, 0.530, 0.535, 0.540, 0.555$ ) материалын энергийн урсгал, температурын хамаарлыг DSC ашиглан хэмжсэн үр дүнг үзүүлэв. Энэ арга нь бага хэмжээний дээжийг өндөр нарийвчлалтай хэмжих, хэмжилт хийх хугацаа богино болон боловсруулалт харьцангуй хялбар зэрэг давуу талуудтай. Эндээс үзэхэд фазын шилжилтийн үед шингээх энергийн хэмжээ Si-ийн агуулгаас хамааран өөрчлөгдөж байгаа нь харагдаж байна. Энэ хэмжилтээс бид фазын шилжилтийн үр дүнд  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_x$  материалд шингээгдэж байгаа энерги болон фазын шилжилтийн температурыг тодорхойлсон.

Зураг.8 -д  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_{0.520}$  хайлшийн шингээх энерги, температурын хамаарлыг үзүүлэв.



Зураг 8:  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_{0.520}$  хайлшийн шингээх энерги, температурын хамаарал

Энд Лоренцийн функцаар хоёр пикээр тохируулга хийсэн бөгөөд эхний пик нь дээжийн суурьтай холбоотой энергийн шингээлтийг зааж байгаа бол хоёр дахь пик нь фазын шилжилтийн дүнд дээжинд шингээгдэж байгаа энергийн урсгалын хэмжээг илэрхийлнэ. Энд  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_{0.520}$  материалын хувьд 276.5 К температурын орчимд фазын шилжилт хийж 2.06 Ж/кг\*К энерги шингээж байгааг үзүүлэв. Хүснэгт.II-д  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_x$  ( $x=0.520, 0.525, 0.530, 0.535, 0.540, 0.555$ ) материалын фазын шилжилт хийх температурын утга болон ялгаруулах энергийн хэмжээг тооцсон үр дүнг үзүүлэв.

| № | Дээжийн нэр                            | $T_{max}(K)$ | $dE(Ж/г*К)$ |
|---|----------------------------------------|--------------|-------------|
| 1 | $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_{0.520}$ | 276.5        | 2.06        |
| 2 | $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_{0.525}$ | 263.1        | 3.97        |
| 3 | $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_{0.530}$ | 277.5        | 2.1         |
| 4 | $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_{0.535}$ | 287          | 4.6         |
| 5 | $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_{0.540}$ | 295          | 1.9         |
| 7 | $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_{0.555}$ | 302          | 2.1         |

Хүснэгт II:  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_x$  хайлшийн фазын шилжилт хийх температурын утга болон ялгаруулах энергийн хэмжээ

#### IV. Дүгнэлт

Бид энэ ажлаар  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_x$  материалын соронзон болон соронзонкалорик шинж чанарыг Si-ийн концентрацаас хамааруулан судлав. Бид хатуу төлөвийн урвалын арга ашиглан гаргаж авсан  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_x$  ( $x=0.520, 0.525, 0.530, 0.535, 0.540, 0.555$ ) дээжүүдийн соронзон мэдрэх чадвар, температурын хамаарлыг судалж материалын соронзон фазын шилжилтийн Кюри температур, Si-ийн концентрацаас хэрхэн хамаарч байгааг үзүүлэв. Мөн дифференциал сканнин калориметр (DSC) ашиг-

лан  $Mn_{1.28}Fe_{0.67}P_{0.48}Si_x$  ферросоронзонгоос парасоронзон төлөвт фазын шилжилт хийхдээ шингээх энерги, Si-ийн концентрацаас хэрхэн хамаарч байгааг тогтоов. Туршилтын үр дүнгээс үзэхэд дээжний соронзон болон соронзонкалорик шинж чанар пахиурын агуулгаас хүчтэй хамаарч байна. Цаашид дээжний соронзон болон соронзонкалорик шинж чанарыгянзын бүрийн соронзон оронд, температураас хамааруулан судлах замаан соронзон энтропын өөрчлөлт болон хувийн дулаан багтаамжыг Si-ийн концентрацаас хамааруулан тогтоох шаардлагатай.

## Талархал

Энэхүү судалгааны ажлыг хийж гүйцэтгэхэд санхүүгийн дэмжлэг үзүүлсэн МУИС-ийн санхүүжилтэй “Соронзон материалыг гарган авах, түүний бүтэц, соронзон болон оптик шинж чанарын судалгаа” сэдэвт зочин судлаачын судлагааны тэтгэлэг болон Азийн судалгааны төв (ARC) –д талархал илэрхийлье.

- 
- [1] Brück E, Tegus O, Thanh DTC, et al., *Magnetocaloric refrigeration near room temperature.*, J Magn Mater, 2007, 310: 793–2799
  - [2] Gschneidner Jr KA, Pecharsky VK, Tsokol AO., *Recent developments in magnetocaloric materials.*, Rep Prog Phys, 2005, 68: 1479–1539
  - [3] Brück E., *Developments in magnetocaloric refrigeration.*, JPhys D-Appl Phys, 2005, 38: R381–R39
  - [4] Tegus O, Brück E, Zhang L, et al., *Magnetic phase transitions and magnetocaloric effects.*, Phys B- Cond Matter, 2002, 319: 174–19
  - [5] A. M. Tishin., in Handbook of Magnetic Materials, edited by K. H. J. Buschow (North Holland, Amsterdam, 1999), Vol. 12, pp. 395–524.
  - [6] V. K. Pecharsky and K. A. Gschneidner, Jr., J. Magn. Mater. 200, 44 (1999), 4.
  - [7] E. Warburg., Ann. Phys. 13, 141 (1881).
  - [8] P. Debye., Ann. Phys. 81, 1154 (1926).
  - [9] W. F. Giaque., J. Amer. Chem. Soc. 49, 1864 (1927).
  - [10] V. K. Pecharsky and K. A. Gschneidner, Jr., J. Appl. Phys. 85, 5365 (1999).
  - [11] K. A. Gschneidner, Jr. and V. K. Pecharsky., Annu. Rev. Mater. Sci. 30, 387 (2000).
  - [12] A. H. Morrish., The Physical Principles of Magnetism (Wiley, New York, 1965), Chap. 3.
  - [13] A. M. Tishin, K. A. Gschneidner, Jr., and V. K. Pecharsky., Phys. Rev. B 59, 503 (1999).
  - [14] Yaoxiang Geng, Zhijie Zhang, Ojied Tegus, Chuang Dong and Yuxin Wang., Sci China Mat, 59 (12), (2016) 1062–1068
  - [15] Tegus O, Fuquan B, Dagula W, et al., J. Alloys Compd, 2005, 396: 6–9
  - [16] Dagula W, Tegus O, Li XW, et al., J Appl Phys, 2006, 99: 08Q105
  - [17] Liu XB, Altounian., J Appl Phys, 2009, 105: 07A902 – 07A902